



**Alexandre Miguel
Condesso Nolasco**

**Análise experimental do comportamento de madres
enformadas a frio**



**Alexandre Miguel
Condesso Nolasco**

**Análise experimental do comportamento de madres
enformadas a frio**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Paulo Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À memória dos meus Avós

o júri

presidente

Prof. Dr. Aníbal Guimarães da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Rui Manuel Carvalho Marques de Faria
Professor Associado com Agregação da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Esta Dissertação resulta do meu esforço, empenho e trabalho, mas que não seria possível sem o contributo de diversas pessoas e instituições através do seu apoio e incentivo.

Gostaria por isso de registar o meu reconhecimento e a minha gratidão:

Ao Professor Doutor Paulo Vila Real, meu orientador, e ao Eng. Nuno Lopes, pela sabedoria transmitida, pelas sugestões dadas, pela valiosa ajuda facultada no LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo da Universidade de Aveiro, pelo empenho e motivação que colocaram nesta orientação e pela amizade demonstrada.

Ao LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, na pessoa do Professor Doutor Joaquim Figueiras, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelo conhecimento e experiência transmitida.

À empresa Constálica SA e a todos os seus colaboradores pelo constante interesse demonstrado na realização desta tese.

À minha colega e amiga Eng.^a Cláudia Amaral que comigo partilhou o nascer e o crescimento desta tese, contribuindo com o seu trabalho no laboratório e com sugestões valiosas.

A todos os meus amigos sem excepção, pelo seu apoio e o seu interesse característico e peculiar nesta dissertação.

Por último, e não menos importante, à minha família, aos meus pais, à minha irmã e às minhas avós, que com a sua preocupação e motivação me ajudaram de forma excepcional a concluir esta tese.

palavras-chave

encurvadura, continuidade, madres, secções enformadas a frio, análise experimental

resumo

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro desenvolveu um sistema inovador de madres, designadas por MadreMax, para a empresa de elementos de construção metálicos *Constálica*, S.A.. Nesta dissertação, apresenta-se um estudo experimental do comportamento de elementos estruturais realizados com esse sistema, abordando o surgimento de fenómenos de encurvadura nos banzos livres, assim como a transmissão de esforços em elementos em continuidade.

Os vários ensaios realizados aos perfis enformados a frio MadreMax encontram-se condensados e descritos em Relatórios de Ensaios, os quais permitem uma fácil consulta e análise.

Nesta tese, através da realização de ensaios experimentais, pretendeu-se obter um melhor conhecimento do comportamento estrutural das secções Ómega MadreMax.

keywords

buckling, continuity, purlins, cold-formed sections, experimental analysis

abstract

The Department of Civil Engineering of the University of Aveiro has developed an innovative system of purlins, designated by MadreMax, for the company of steel construction elements *Constálica*, S.A. In this dissertation, an experimental study of the behavior of these elements is presented, approaching the appearance of buckling phenomena on the flanges, as well as efforts transmission with elements in continuity.

The various tests made on the cold formed MadreMax profiles are condensed and described in Test Reports, which allow an easy reading and analysis.

This thesis limits to the experimental analysis of the studies elements, which is intended to provide a better understanding of the structural behavior of these MadreMax Omega sections.

Análise Experimental do Comportamento de Madres Enformadas a Frio

ÍNDICE GERAL

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Considerações gerais	2
1.2. Objectivos	4
1.3. Estruturação da Tese	5
1.4. Projecto MadreMax	6
Capítulo 2 – Metodologia dos ensaios experimentais	9
2.1. Pressupostos dos ensaios de acordo com o Eurocódigo 3	10
2.2. Equipamentos utilizados nos ensaios	13
2.3. Software utilizado nos ensaios	22
2.4. Metodologia dos ensaios	25
2.5. Relatório de Ensaio	30
Capítulo 3 – Campanha experimental	33
3.1. Apresentação geral dos ensaios	34
3.1.1. Ensaios com um vão	36
3.1.2. Ensaios em continuidade – dois vãos	41
3.2. Previsão do comportamento experimental das madres	46
3.3. Resultados obtidos	54
3.4. Análise e discussão dos resultados	59

Capítulo 4 – Metodologia de cálculo baseada no EC3	65
4.1. Apresentação da metodologia de cálculo	66
4.2. Aplicação da metodologia de cálculo: exemplos	75
4.2.1. Exemplo 1: um vão com a madre simplesmente apoiada	75
4.2.2. Exemplo 2: um vão com a madre encastrada nos apoios	77
 Capítulo 5 – Considerações finais	 79
5.1. Conclusões finais	80
5.2. Desenvolvimentos futuros	83
 Referências bibliográficas	 85
 Anexos	 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 – Introdução

Figura 1 – Estrutura em perfis enformados a frio de um edifício industrial.	3
Figura 2 – Perfil MadreMax.	7
Figura 3 – Perfis enformados a frio MadreMax.	7

Capítulo 2 – Metodologia dos ensaios experimentais

Figura 4 – Esquema de carregamento: situação de simplesmente apoiado e em continuidade.	11
Figura 5 – Deformação de uma madre do tipo MadreMax no decorrer de um ensaio.	12
Figura 6 –. Pórticos de reacção utilizados para os ensaios com um vão e com dois vãos, respectivamente. a) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - LABEST; b) Universidade de Aveiro – LERF	13
Figura 7 – Pormenores do pórtico de reacção do LERF.	14
Figura 8 – Acessórios do pórtico de reacção.	14
Figura 9 – Actuadores.	15
Figura 10 – Central hidráulica.	15
Figura 11 – Mesa de controlo.	16
Figura 12 – Apoios utilizados para a fixação das madres.	16
Figura 13 – Rolete metálico e meia cana.	17
Figura 14 – Vigas de carregamento das madres.	17
Figura 15 – Rótula.	18
Figura 16 – Cantoneira e sua colocação no sistema de ensaio.	18
Figura 17 – Barra metálica rígida.	19
Figura 18 – Tira de neoprene utilizada para a protecção da madre.	19
Figura 19 – Barrote de madeira colocado entre as almas de um perfil MadreMax.	20
Figura 20 – LVDT's: o primeiro usado para quantificar os deslocamentos verticais e o segundo para os deslocamentos relativos horizontais. A terceira imagem apresenta o seu modo de utilização.	21
Figura 21 – Alvos para a medição de deslocamentos horizontais relativos.	21
Figura 22 – Janela de abertura do software.	22

Figura 23 – Janela do software – definição do ensaio.	23
Figura 24 – Janela do software – caracterização dos actuadores.	23
Figura 25 – Janela do software – gráficos força – deslocamento em tempo real no decorrer do ensaio.	24
Figura 26 – Posições das madres utilizadas nos ensaios.	26
Figura 27 – Acção descendente e ascendente das cargas.	26
Figura 28 – Situação de carregamento: inicial e no decorrer do ensaio.	27
Figura 29 – Apoio simples, através de rolete metálico, apoio duplo, através de meia-cana e encastramento, por intermédio de ligação aparafusada ao pórtico de reacção.	28
Figura 30 – Perfil de apoio do tipo H e do tipo tubular.	28

Capítulo 3 – Campanha experimental

Figura 31 – Dispositivo tipo de ensaio - I Fase de Ensaaios.	34
Figura 32 – Dispositivo tipo de ensaio - II Fase de Ensaaios.	35
Figura 33 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 100 \times 1.5$.	36
Figura 34 – Colocação da madre ao perfil de apoio.	37
Figura 35 – Carregamento da madre.	37
Figura 36 – Perfil tubular no qual se apoia a madre na sua posição invertida. Sob o perfil está colocado um rolete metálico.	40
Figura 37 – Aplicação de chapas metálicas a unir os banzos livres do perfil.	40
Figura 38 – Carregamento da madre.	41
Figura 39 – Colocação do painel sandwich aos dois alinhamentos de madres.	42
Figura 40 – Reforço por sobreposição de secções MadreMax.	44
Figura 41 – Dispositivo de carregamento utilizado no ensaio 13 da II Fase.	44
Figura 42 – Dispositivo de carregamento utilizado no ensaio 14 da II Fase.	45
Figura 43 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transversal e momento-flector para um único vão, simplesmente apoiado e cargas descendentes.	48
Figura 44 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transversal e momento-flector para um único vão, simplesmente apoiado e cargas ascendentes.	49
Figura 45 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transversal e momento-flector para um único vão, encastrado e cargas descendentes.	50
Figura 46 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transversal e momento-flector para um único vão, encastrado e cargas ascendentes.	50

Figura 47 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transversal e momento-flector para dois vãos, simplesmente apoiados e cargas descendentes.	51
Figura 48 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transversal e momento-flector para dois vãos, simplesmente apoiados e cargas ascendentes.	52
Figura 49 – Força – deslocamento (KN/mm) - pelo LVDT interno do actuador.	55
Figura 50 – Força – deslocamento (KN/mm) – pelos LVDT's colocados para quantificar deslocamentos relativos horizontais.	55
Figura 51 – Força – deslocamento (KN/mm) - pelos LVDT's colocados para quantificar deslocamentos verticais.	56
Figura 52 – Pormenor da rotação da secção do perfil MadreMax no decorrer de um ensaio.	62
Figura 53 – Pormenor da formação de um vinco – banzo livre sujeito à compressão.	62
Figura 54 – Rotura – banzo livre sujeito à tracção.	63

Capítulo 4 – Metodologia de cálculo baseada no EC3

Figura 55 – Decomposição da secção MadreMax em duas secções Z.	66
Figura 56 – Secção Ω MadreMax.	66
Figura 57 – Localização do centro de corte nos perfis C e Σ .	67
Figura 58 – Eixos principais de inércia na secção Z e deformação sofrida por uma madre flectida.	67
Figura 59 – Tirantes de contraventamento.	68
Figura 60 – Metade da secção MadreMax.	69
Figura 61 – Definição do banzo livre da secção em estudo.	70
Figura 62 – Rigidez lateral do banzo livre.	71
Figura 63 – Definição de h_d .	72

Capítulo 7 – Anexos

Figura 64 – Dispositivo do Ensaio n.º 4 – II.	91
Figura 65 – Registos fotográficos do Ensaio n.º 4 – II.	93
Figura 66 – Força - deslocamento – LVDT interno do actuador.	93
Figura 67 – LVDT's horizontais – deslocamentos relativos entre os dois banzos livres.	94
Figura 68 - LVDT's verticais – sob os pontos de aplicação das cargas e a meio vão.	94

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 3 – Campanha experimental

Tabela 1 – Valores da tensão real de cedência da chapa.	47
Tabela 2 – Apresentação das grandezas contabilizadas no decorrer do ensaio.	54
Tabela 3 – Tabela resumo de resultados da I Fase de Ensaaios.	57
Tabela 4 – Tabela resumo de resultados da II Fase de Ensaaios.	58
Tabela 5 – Verificação da segurança – I Fase de Ensaaios.	60
Tabela 6 – Verificação da segurança – II Fase de Ensaaios.	61
Tabela 7 – Massas dos acessórios utilizados nos ensaios.	64

Capítulo 4 – Metodologia de cálculo baseada no EC3

Tabela 8 – Resultados do método de cálculo para as condições de simplesmente apoiado.	76
Tabela 9 – Resultados do método de cálculo para as condições de encastramento.	77

NOMENCLATURA

Letras maiúsculas latinas

C	Secções de madres do tipo C
E	Módulo de elasticidade do aço
K	Rigidez elástica lateral
P	Carga pontual
R	Rigidez conferido pelos apoios às madres
Z	Secções de madres do tipo Z
LVDT	Linear Variable Differential Transformers
C.G.	Centro de gravidade
C_D	Rigidez rotacional
$C_{D,A}$	Rigidez rotacional da ligação entre a chapa de revestimento e a madre
$C_{D,C}$	Rigidez rotacional correspondente à rigidez de flexão da chapa de cobertura
I_{fz}	Inércia do banzo livre segundo zz
L_a	Distância entre tirantes de contraventamento
$M_{y,Ed}$	Momento – flector actuante em yy
P_{exp}	Carga de rotura obtida experimentalmente
P_{rd}	Carga de rotura da secção transversal
$P_{b,rd}$	Carga de rotura correspondente à encurvadura do banzo livre do perfil
$W_{eff,y}$	Módulo de flexão em yy

Letras minúsculas latinas

a	Distância desde o ponto de ligação da madre à chapa/painel até à alma do perfil
b	Comprimento do banzo superior do perfil MadreMax
c	Comprimento da aba (banzo da MadreMax)
h	Altura da secção
p	Número de ligadores por metro linear (ligação madre – chapa)
t	Espessura
c.c.	Centro de corte

f_y	Tensão de cedência
h_d	Comprimento do desenvolvimento da alma do perfil MadreMax
i_{fz}	Raio de giração do banzo livre
l_{fz}	Comprimento de encurvadura do banzo livre
q_{FD}	Carga que actua no banzo superior da MadreMax
$uu - vv$	Eixos principais
$yy-zz$	Eixos baricêntricos

Caracteres do alfabeto grego

Ω	Secção de madres do tipo Ómega
Σ	Secção de madres do tipo Sigma
ν	Coefficiente de Poisson
λ	Esbelteza
π	Pi (representa o valor 3,1415)
$\sigma_{m\acute{a}x,Ed}$	Tensão máxima actuante
$\sigma_{y,sd}$	Tensão actuante
γ_{M0}	Coefficiente parcial de segurança
γ_{M1}	Coefficiente parcial de segurança
χ_{LT}	Factor de redução para a encurvadura lateral
λ_{fz}	Esbelteza do banzo livre
Φ_{LT}	Coefficiente utilizado para o cálculo do factor de redução da encurvadura lateral
α_{LT}	Factor de imperfeição para a encurvadura lateral
λ_{LT}	Esbelteza para a encurvadura lateral

INTRODUÇÃO

Capítulo 1

1.1. Considerações gerais

A presente dissertação para obtenção do grau de Mestre tem como tema a *Análise Experimental do Comportamento de Madres Enformadas a Frio*. Esta é uma área da Engenharia Civil que ainda se encontra em franco desenvolvimento e que aqui será tratada por uma vertente mais experimental.

Este documento tem como primordial objectivo apresentar e expor o trabalho desenvolvido com o intuito de aprofundar o conhecimento do comportamento dos elementos enformados a frio, neste caso do tipo MadreMax.

Esta dissertação encontra-se no seguimento da proposta da empresa que comercializa os perfis MadreMax, *Constálica S.A.*, para a realização de um estudo experimental aos perfis em causa [1]. Por se tratar de um assunto pouco desenvolvido, com enorme potencialidade no futuro da engenharia de estruturas surge a necessidade de aumentar o conhecimento existente deste tipo de perfil, estudando a optimização e racionalização da sua aplicação.

O interesse neste tema acentua-se com a crescente utilização de perfis metálicos enformados a frio nas mais diversas aplicações das obras de Engenharia Civil, tratando-se de um tema pouco abordado e que se encontra em pleno desenvolvimento. Esta utilização possibilita alternativas extremamente viáveis, quer a níveis económicos quer a níveis estruturais, para a resolução de diversas questões que se colocam nas estruturas que, não descuidando a sua resistência, originam estruturas mais ligeiras, o que constitui uma mais valia da sua aplicação [2].

Sendo muitas vezes considerados perfis secundários, isto é, perfis sem uma conotação estrutural dominante, estes perfis que têm um processo de fabrico por perfilagem, ou seja, enformados a frio, apresentam normalmente uma secção de classe 4 [3, 4]. Estes são perfis metálicos com secções transversais em que, para determinar a sua resistência ao momento - flector e à compressão, é necessário entrar em conta explicitamente com os efeitos da encurvadura local [5]. Dando seguimento a esta definição, conhecer e avaliar o comportamento dos perfis metálicos MadreMax relativamente aos fenómenos de encurvadura, quer global, quer local, toma um significado e uma importância redobrada, pois só assim contribui para uma utilização mais racional, equilibrada e economicamente viável deste tipo de perfis.

Devido também à agitação actual do mercado mundial do aço [6], este tipo de perfis enformados a frio têm tido um aumento significativo na sua aplicação, desempenhando um papel

mais preponderante nas estruturas modernas, fazendo com que os rácios *peso/resistência* diminuam [2], promovendo uma redução dos custo da estrutura. A figura 1 mostra a estrutura, em perfis enformados a frio, de um edifício industrial.



Figura 1 – Estrutura em perfis enformados a frio de um edifício industrial [7].

A análise dos resultados obtidos, nos diversos ensaios laboratoriais realizados, contribuirá para introduzir melhorias significativas nas secções dos perfis, bem como no dimensionamento de estruturas e procedimento de aplicação em obra. Esta análise experimental também contribuirá assim para uma inovação tecnológica na concepção e construção de estruturas, com o sistema MadreMax.

1.2. Objectivos

Tendo por base uma procura continuada da melhoria de perfis enformados a frio, o principal objectivo desta dissertação foi, através de uma análise experimental, avaliar a resistência de elementos enformados a frio, madres do tipo MadreMax no presente caso, bem como obter um melhor conhecimento do comportamento quanto aos fenómenos de instabilidade da madre.

É também objectivo avaliar a transmissão de esforços neste sistema com os elementos em continuidade.

Através dos diversos ensaios realizados foi possível simular situações reais, em ambiente controlado de laboratório, de estruturas constituídas por madres, levando essas mesmas estruturas às situações mais extremas e variadas.

1.3. Estruturação da Tese

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos que traduzem o desenvolvimento do trabalho realizado e que sintetizam a análise experimental levada a cabo aos perfis enformados a frio MadreMax, desde a preparação dos ensaios até à discussão dos resultados.

O presente capítulo apresenta uma descrição geral dos assuntos abordados e expõe os objectivos e a estruturação da dissertação.

No **Capítulo 2** é apresentada a metodologia adoptada para a realização dos ensaios laboratoriais. Indicar-se-ão os pressupostos e cuidados que se tiveram na realização dos ensaios, de acordo com o Eurocódigo 3 (EC3), bem como se apresentam os equipamentos, acessórios e instrumentos utilizados na realização dos mesmos. É também neste capítulo que se faz uma breve apresentação do software e hardware usados nos ensaios experimentais. Para concluir, expõe-se o documento tipo utilizado para sintetizar e organizar as informações inerentes aos ensaios realizados (*Relatório de Ensaio*).

No **Capítulo 3** é realizada uma apresentação e descrição dos diversos ensaios realizados, focando as principais particularidades e diferenças. Neste capítulo apresentam-se os diagramas de esforços característicos para os diferentes ensaios e descrevem-se os comportamentos esperados. Após a apresentação dos resultados obtidos, é realizada a respectiva análise e discussão.

O **Capítulo 4** incorpora uma proposta de metodologia de cálculo, baseada no Eurocódigo 3, e que está complementada com exemplos de cálculo que traduzem alguns dos ensaios concretizados em laboratório.

No **Capítulo 5** apresentam-se as conclusões finais de todo o trabalho desenvolvido, destacando-se algumas possíveis linhas para desenvolvimentos futuros.

Para finalizar esta dissertação, apresentam-se as referências bibliográficas e, em anexo, um *Relatório de Ensaio*.

1.4. Projecto MadreMax

O projecto MadreMax surgiu em 2004 e visa o desenvolvimento de um novo perfil metálico designado por MadreMax [8]. A ideia surgiu da empresa Constálica S.A. e que, trabalhando em sinergia com o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, originou um perfil inovador, capaz de suprir lacunas existentes no âmbito das construções modernas.

O estudo destes perfis metálicos enformados a frio foi estruturado em 3 grandes fases, tendo tido a colaboração do Gabinete de Engenharia *Pascal Engenheiros Lda.*, na primeira fase. Este projecto conta então com três fases distintas: Fase I – Definição e caracterização geométrica das secções transversais com vista ao dimensionamento através do EC3 [8]; Fase II – Análise de optimização estrutural [9], e Fase III – Análise laboratorial para a validação mecânica. Esta Tese enquadra-se assim na terceira fase do projecto, procedendo-se à realização dos ensaios laboratoriais e à respectiva análise de resultados com o intuito de se conhecer e compreender melhor o comportamento do perfil relativamente a fenómenos como a instabilidade (encurvadura) e a transmissão de esforços por continuidade, melhorando assim os estudos iniciais do projecto.

MadreMax é mais que um perfil metálico, é um sistema estrutural destinado à aplicação em todo o tipo de estruturas. A sua principal característica é a possibilidade de sobreposição, permitindo tirar partido da continuidade nos apoios, admitindo ainda o reforço das secções críticas duplicando a sua capacidade resistente [8, 10]. O sistema MadreMax possibilita ainda o cruzamento entre elementos de secção igual ou diferente, consentindo uma grande flexibilidade de montagem e de soluções construtivas uma vez que apresenta, longitudinalmente, furação de 50 em 50mm, quer nos seus banzos livres, quer nas suas almas. A sua produção desenvolve-se em três linhas de perfilagem totalmente automatizadas, com o respectivo controlo de qualidade [11]. O aço utilizado é do tipo estrutural, da classe S320GD Z/ZF, segundo a norma europeia EN 10326 [12]. O sistema MadreMax foi desenvolvido para 3 tipos de secções, $\Omega 100 \times 1.5$, $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$, sendo as três primeiras em chapa de 1.5mm e a última em chapa de 2.0mm de espessura [10]. Todo o sistema MadreMax é patenteado através de modelos de utilidade [10]. As figuras 2 e 3 apresentadas de seguida ilustram, respectivamente, a geometria ómega das secções MadreMax e a sua acomodação.

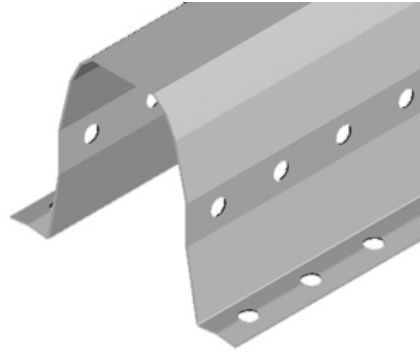


Figura 2 – Perfil MadreMax [7].



Figura 3 – Perfis enformados a frio MadreMax [7].

METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Capítulo 2

2.1. Pressupostos dos ensaios de acordo com o Eurocódigo 3

A realização de ensaios laboratoriais requer um conhecimento e uma preparação prévia que depende do tipo de ensaio a realizar bem como do elemento que se está a ensaiar.

Os ensaios realizados tiveram um período de preparação no qual se elaboraram e conceberam as várias modalidades de ensaio. Esta preparação analisou a vertente mais analítica e teórica do comportamento das madres em concordância com as questões laboratoriais existentes, afim de se poderem obter os resultados que melhor pudessem reproduzir a aplicação em serviço do sistema em estudo.

Deste modo, o Eurocódigo 3, parte 1-3, Anexo A – *Testing Procedures* [5], apresenta as seguintes linhas gerais para a concretização dos ensaios:

- o ensaio deverá ser representativo de soluções construtivas reais, no que diz respeito ao próprio elemento a ensaiar bem como aos acessórios utilizados (como os pórticos de reacção, os apoios e os acessórios utilizados para a aplicação das cargas), não devendo estes ter rigidez e características muito diferentes das que na realidade existem em obra;
- para cada estado de carregamento os deslocamentos deverão ser medidos num ou mais pontos considerados característicos e representativos do elemento a ensaiar;
- o término do ensaio ocorre quando:
 - se observa o colapso ou fractura do elemento em teste,
 - se as deformações forem excessivas.

Indo ao encontro da secção A.3.4 do Anexo A do Eurocódigo 3 parte 1-3 [5] deve ter-se ainda em conta os seguintes aspectos:

- Os ensaios devem possibilitar a determinação dos momentos resistentes e da capacidade de rotação da secção;
- Os elementos a ensaiar devem ter comprimentos de pelo menos 15 vezes a sua maior dimensão transversal. O espaçamento de apoios para o banzo em compressão não deve ser menor que o espaçamento usado em serviço.

- Os pontos de aplicação das cargas pontuais devem-se situar entre $1/5$ e $1/3$ do vão, originando um momento-flector uniforme no troço central. As cargas deverão ser aplicadas no centro de corte transversal. Os deslocamentos deverão ser, sempre que possível, quantificados nos pontos de aplicação das cargas e a meio vão.

Na preparação e concepção de cada ensaio estes pressupostos sugeridos foram tidos em consideração, de modo a originar, o mais possível, uma simulação das condições de serviço.

A disposição do esquema estrutural de cada tipo de ensaio foi conciliada com as condições físicas existentes nos laboratórios (LABEST e LERF), simulando as situações mais comuns de utilização das madres (situações de simplesmente apoiado e situações de continuidade). Todos os ensaios foram controlados pelo deslocamento e não pela força, como intuito de se obter uma melhor percepção do comportamento mecânico do elemento de teste.

Na maioria dos ensaios efectuou-se a medição relativa dos deslocamentos, quer verticais quer horizontais, nos pontos considerados mais representativos do sistema. Questões relacionadas com a dimensão do elemento em estudo também foram cuidadas, indo ao encontro das especificações do EC3. Os pontos de aplicação das cargas situaram-se a $1/3$ do vão, quer no caso de se tratar de elementos simplesmente apoiados ou de elementos em continuidade, como ilustra a figura 4.

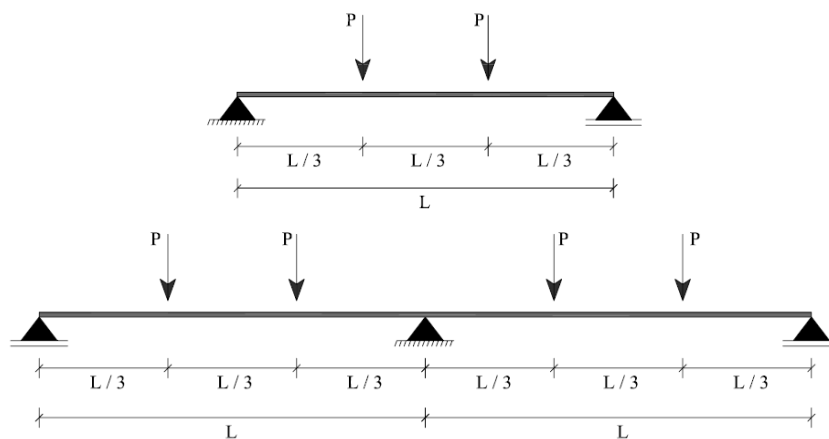


Figura 4 – Esquema de carregamento: situação de simplesmente apoiado e em continuidade.

Os ensaios consideravam-se concluídos quando ocorria uma perda de resistência do elemento, ou quando as deformações fossem excessivas. Por vezes, e por questões relacionadas com a

segurança, o término do ensaio teve de ser antecipado, de forma a não colocar em risco os equipamentos utilizados nos ensaios e os operadores.

As questões de segurança estiveram sempre presentes no decorrer dos ensaios, pois devido à complexidade dos ensaios e à utilização de equipamento (como o actuador), capaz de colocar em risco a integridade física dos técnicos e danificar instrumentos manifestamente sensíveis e dispendiosos, foi necessário o cumprimento de regras básicas de segurança de um laboratório.

A figura 5 mostra a deformação de uma madre no decorrer de um ensaio.

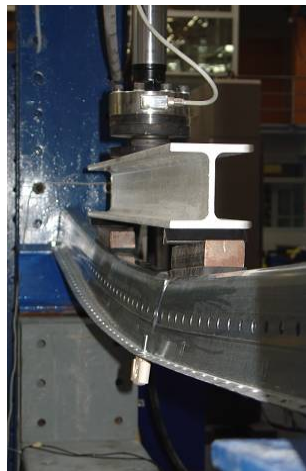


Figura 5 – Deformação de uma madre do tipo MadreMax no decorrer de um ensaio.

2.2. Equipamentos utilizados nos ensaios

A par de toda a preparação dos ensaios foi necessário providenciar um vasto número de equipamentos e acessórios, sem os quais não seria possível a realização dos diversos ensaios. Estes equipamentos e acessórios possibilitaram a simulação das condições a que os elementos normalmente se encontram sujeitos, contribuindo assim para um controlo do próprio ensaio e consequentemente dos resultados inerentes a este.

De seguida apresentam-se todos os equipamentos, bem como as suas funções e especificações, de forma a contribuir para uma melhor compreensão da metodologia utilizada nos ensaios realizados.

i) *Pórtico de reacção*

Estrutura metálica na qual se instala o elemento de teste, bem como todos os mecanismos e acessórios que possibilitam o controlo do ensaio. Para a presente análise experimental foram usados dois pórticos distintos, no que respeita às suas dimensões.



a)



b)

Figura 6 – Pórticos de reacção utilizados para os ensaios com um vão e com dois vãos, respectivamente.

a) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - LABEST; b) Universidade de Aveiro - LERF



Figura 7 – Pormenores do pórtico de reacção do LERF.

ii) Acessórios do pórtico de reacção

Devido às dimensões dos pórticos de reacção, por vezes foi necessária a aplicação de perfis metálicos, acessórios, capazes de suprir lacunas existentes, como a distância entre o elemento a ensaiar e o actuador. Para estes casos utilizaram-se perfis metálicos, ora aplicados na viga inferior ora aplicados na viga superior, capazes de garantir uma distância adequada entre os diferentes elementos, para a realização do ensaio.



Figura 8 – Acessórios do pórtico de reacção.

iii) Actuadores

Actuadores são os mecanismos que, accionados hidraulicamente, aplicam de forma controlada o carregamento dos elementos em estudo. No presente caso utilizaram-se actuadores com uma capacidade máxima de 100kN.



Figura 9 – Actuadores.

iv) *Central hidráulica*

O sistema energético que alimenta hidraulicamente os actuadores encontra-se ligado ao software, o qual controla as operações dos actuadores.



Figura 10 – Central hidráulica.

v) *Mesa de controlo – computador*

É o dispositivo no qual está instalado o software de controlo de todo o ensaio, mais especificamente os actuadores e os LVDT's (Linear Variable Differential Transformer), permite, em tempo real, verificar o desenvolvimento do ensaio, se necessário realizar algum ajuste e dar por concluído o ensaio.



Figura 11 – Mesa de controlo.

vi) *Apoio metálicos*

São elementos metálicos que serviram de apoio às madres, simulam os apoios usualmente utilizados nas diversas construções (como as asnas ou pilares).



Figura 12 – Apoios utilizados para a fixação das madres.

vii) *Roletes metálicos e meia-cana*

Os roletes metálicos foram os acessórios utilizados para simular as condições de simplesmente apoiado. Foram colocados sob os apoios permitindo assim que estes rodem livremente, originando um apoio simples. A meia-cana tem o mesmo objectivo, contudo não

possibilita qualquer tipo de translação uma vez que não consegue rodar sobre o seu próprio eixo, ao contrário do que sucede com os roletes, originando um apoio duplo.



Figura 13 – Rolete metálico e meia cana.

viii) Vigas de carregamento

As vigas de carregamento utilizadas foram perfis metálicos do tipo H que transferem a carga do actuador para o elemento em teste. Dispõem-se, normalmente, na direcção longitudinal do elemento e, com o auxílio de outros acessórios, possibilita o carregamento da madre em dois pontos distintos.



Figura 14 – Vigas de carregamento das madres.

ix) *Rótula*

Utilizou-se um mecanismo metálico que possibilita qualquer tipo de rotação na aplicação da carga pelo actuador. Foi colocado entre o actuador e a viga de carregamento para que a rotação no elemento em estudo não danificasse eixo do actuador nem o modo de carregamento da madre.



Figura 15 – Rótula.

x) *Cantoneiras*

Foram introduzidas cantoneiras que, devido à sua geometria, permitiam a rotação de duas superfícies planas em sentidos opostos, encontrando-se por isso entre o perfil em teste (ou acessório que lhe transmite a carga) e a viga de carregamento. Esta particularidade garante que a madre se possa deformar devido à aplicação da acção, garantido um certo grau de nivelamento da viga de carregamento, não introduzindo ao elemento esforços secundários.



Figura 16 – Cantoneira e sua colocação no sistema de ensaio.

xi) Barras rígidas

Foram também utilizadas barras com rigidez elevada, sendo estes os últimos elementos metálicos em contacto com a madre. É através deles que se efectua o carregamento do elemento, razão suficiente para a sua significativa rigidez. Apresenta um comprimento de 230mm e uma secção de 30 x 40mm².



Figura 17 – Barra metálica rígida.

xii) Tiras de neoprene

São usadas tiras de neoprene entre os dispositivos de carregamento e a madre (por exemplo a barra rígida), de forma a não danificar excessivamente a superfície da madre, protegendo-a deste modo da aplicação directa e pontual da carga. O neoprene [13] é um material resultante da combinação de borrachas expandidas a alta pressão e temperatura, conferindo ao material um comportamento elástico.



Figura 18 – Tira de neoprene utilizada para a protecção da madre.

xiii) *Barrotes de madeira*

Para a realização dos ensaios com a madre a sua posição invertida foi necessário conceber um acessório capaz de se colocar entre as almas do perfil MadreMax e carregar o banzo desse mesmo perfil. Este acessório não é mais que um barrote de madeira com uma geometria trapezoidal que se ajusta à forma da própria madre.

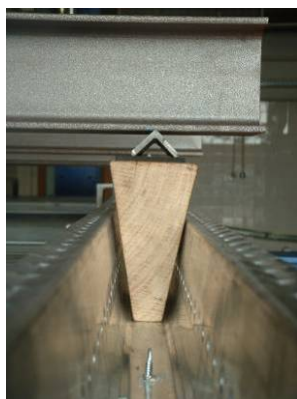


Figura 19 – Barrote de madeira colocado entre as almas de um perfil MadreMax.

xiv) *LVDT's*

Os LVDT's (Linear Variable Differential Transformers) [14] são instrumentos de medição de deslocamentos. Estes foram utilizados para quantificar os deslocamentos verticais e os deslocamentos relativos horizontais das almas dos perfis em teste. Encontram-se ligados ao software de controlo do ensaio e, através dele, permitem observar em tempo real o desenvolvimento do perfil relativamente às deformações.



Figura 20 – LVDT's: o primeiro usado para quantificar os deslocamentos verticais e o segundo para os deslocamentos relativos horizontais. A terceira imagem apresenta o seu modo de utilização.

xv) Alvos

Os alvos não são mais do que pequenas cantoneiras metálicas que se aplicaram nos banzos livres dos perfis MadreMax com o objectivo de se conseguir quantificar os deslocamentos relativos horizontais das abas, ou seja, a abertura do perfil.

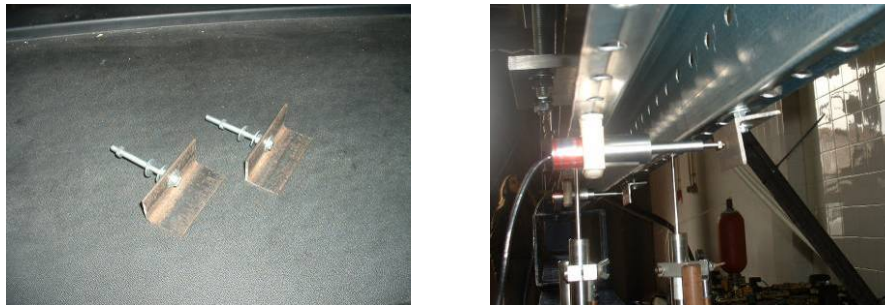


Figura 21 – Alvos para a medição de deslocamentos horizontais relativos.

Para finalizar, e tratando-se na sua grande maioria de perfis metálicos e de mecanismos, a montagem e desmontagem de todo o sistema de ensaio requereu uma panóplia elementar de ferramentas.

2.3. Software utilizado nos ensaios

O software utilizado para o controlo dos actuadores foi o *DynaTester* [15], sendo fornecido pelo fabricante dos actuadores. É um software prático e simples que permite um controlo total do ensaio em causa.

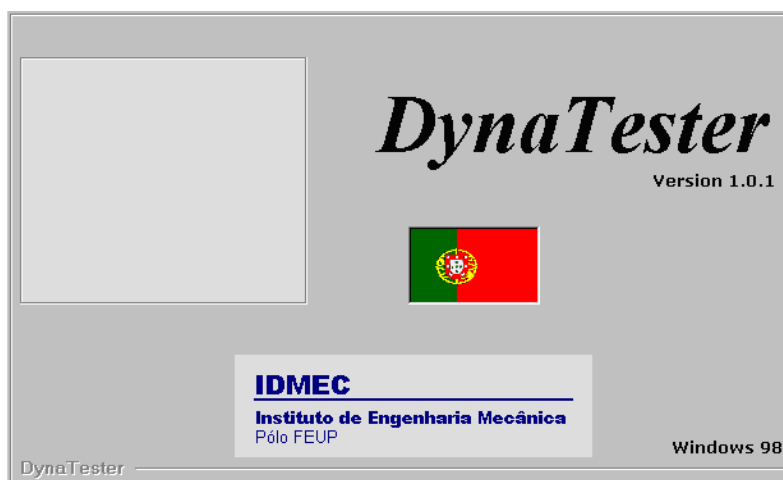


Figura 22 – Janela de abertura do software.

Este programa permite ao seu utilizador duas modalidades de controlo do ensaio: por deslocamento ou por força. O controlo pelo deslocamento consiste na imposição de um deslocamento ao actuador, com uma velocidade pré-estabelecida, velocidade esta ajustável pelo utilizador e expressa em mm/seg. Este tipo de controlo torna-se mais seguro na medida em que, como existe um deslocamento imposto, quando se dá o colapso do elemento em estudo pode-se mais facilmente dar por concluído o ensaio sem necessidade de correr riscos que coloquem em perigo a integridade dos aparelhos e instrumentos, e até mesmo a integridade física dos técnicos operadores.

Outra modalidade de controlo é a chamada controlo por força onde, de um modo geral, o utilizador impõe uma força máxima ao actuador que, apenas quando é atingida, se imobiliza. Esta é uma razão suficiente para se considerar uma modalidade de controlo mais perigosa e que no presente caso não se ajusta ao modelo de ensaio pretendido.

Este software possibilita a visualização da resposta dos elementos de medição de deslocamentos, como os LVDT's, e permite em tempo real observar as curvas de força - deslocamento consequentes dos ensaios, ora pelos vários LVDT's instalados no elemento em estudo, ora pelo LVDT interno que os actuadores possuem.

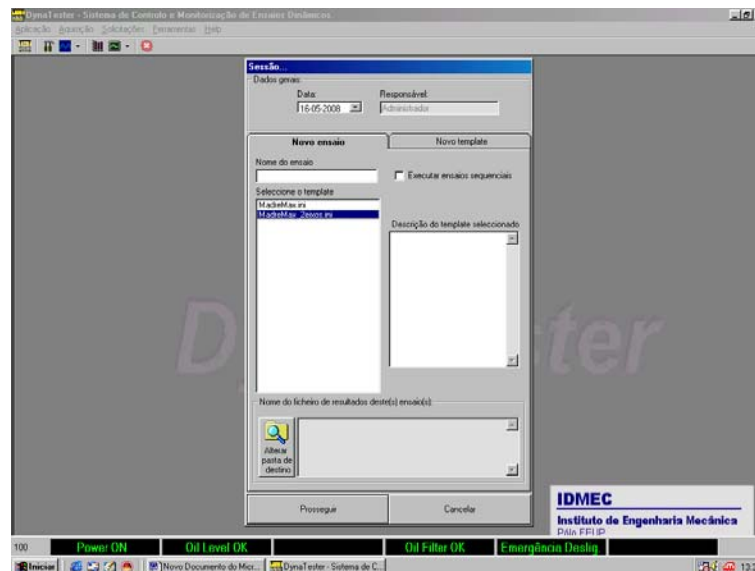


Figura 23 – Janela do software – definição do ensaio.

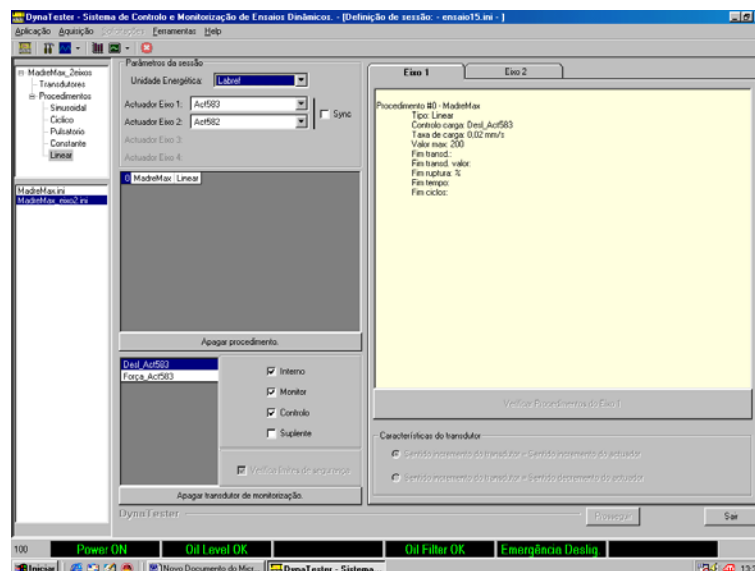


Figura 24 – Janela do software – caracterização dos actuadores.

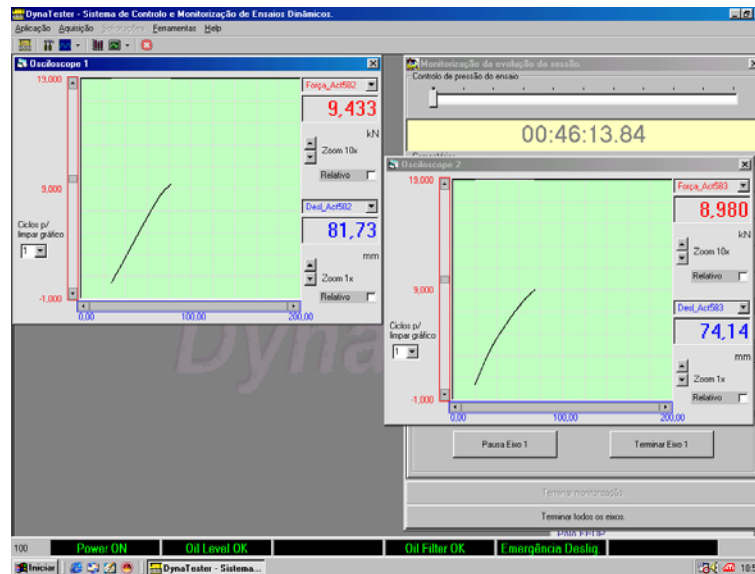


Figura 25 – Janela do software – gráficos força – deslocamento em tempo real no decorrer do ensaio.

Para concluir, é importante referir que após a conclusão do ensaio o software guarda e converte os dados do mesmo num ficheiro de dados do tipo Excel, possibilitando assim o posterior tratamento e análise dos resultados.

2.4. Metodologia dos ensaios

A realização de ensaios mecânicos, a elementos construtivos, requer uma metodologia bem clarificada e objectiva, que contribui para resultados verosímeis e viáveis. Os ensaios mecânicos pretendem, para além do natural aprofundamento do conhecimento sobre a madre, simular em condições controladas o comportamento do elemento e verificar a sua resposta às acções que lhe são aplicadas, para que seja possível retirar conclusões que contribuam para a melhoria do próprio perfil, numa primeira instância, e por fim do sistema construtivo.

Os ensaios mecânicos realizados seguiram de um modo geral seis grandes etapas de desenvolvimento.

A primeira, *preparação prévia do sistema de ensaio*, que consiste, como o próprio nome indica, na preparação de todos os elementos necessários à realização do ensaio, como a colocação no pórtico de reacção dos equipamentos, a fixação no devido local dos actuadores e aprovisionamento de outros acessórios como os barrotes de madeira, barras metálicas, entre outros.

A segunda etapa, denominada por *montagem do sistema de ensaio*, é onde se executa a montagem propriamente dita do elemento em estudo, com o auxílio das necessárias ferramentas, é onde também se colocam os medidores de deslocamentos na madre em teste.

Seguidamente vem a terceira etapa, *ajuste do sistema de ensaio*, onde se leva a cabo uma série de procedimentos com o objectivo de nivelar e alinhar a madre com os restantes equipamentos e acessórios que com ela interagem, é uma etapa fundamental para o bom desenvolvimento do ensaio, pois só assim se garante uma minimização das excentricidades e esforços que, naturalmente, se instalam em situações deste tipo.

A quarta etapa consiste no ensaio propriamente dito, neste realiza-se o carregamento da madre e regista-se os resultados, intitulando-se por *carregamento do elemento em estudo*.

Levada a madre até à sua rotura, é agora a vez de a descarregar e, consequentemente, desmontar o sistema de ensaio, sendo esta a quinta etapa, *desmontagem do sistema de ensaio*.

Por último, vem o *tratamento de resultados*, e é onde se procede à sua recolha e posterior tratamento, sendo esta a sexta etapa.

A realização dos ensaios foi efectuada em diversas modalidades e, para uma melhor compreensão, é importante distinguir duas posições distintas que as madres podem apresentar.

Devido à sua geometria característica, com formato ómega, os perfis MadreMax possibilitam as duas seguintes posições: normal e invertida, tal como mostra a figura seguinte.

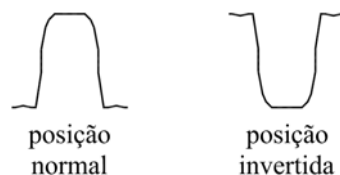


Figura 26 – Posições das mães utilizadas nos ensaios.

A posição da mãe utilizada nos ensaios dependeu da situação de carregamento que se pretendia simular. Assim, para simular a acção descendente das cargas, colocou-se a mãe na sua posição normal, sendo esta carregada pelo lado exterior do seu bazeo, enquanto que para simular a acção descendente da carga colocou-se a mãe na sua posição invertida, sendo esta carregada também pelo seu bazeo só que desta vez pelo seu lado interior, isto é, entre as suas almas, como ilustra a figura 28.

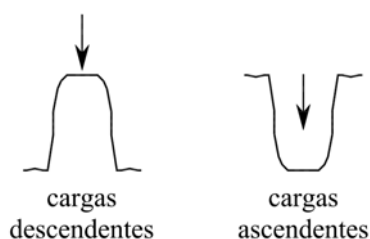


Figura 27 – Acção descendente e ascendente das cargas.

Nos ensaios realizados a aplicação da carga nas mães efectuou-se por intermédio de um dispositivo que depende do tipo de ensaio e consequentemente da posição da mãe. Independente destes factos, a zona de contacto entre esse mesmo dispositivo de carregamento e o elemento em estudo apresentava um desenvolvimento de 230mm. A colocação destes elementos requereu sempre uma atenção redobrada, pois o alinhamento com a mãe e a centralidade com o bazeo são particularidades importantes.

Contudo, este sistema de carregamento acarreta consigo uma desvantagem e que está relacionada com a superfície de contacto entre o dispositivo de carregamento e o bazeo da mãe. Com o decorrer do ensaio, esta superfície de contacto vai diminuindo progressivamente até que

culmina apenas em duas pequenas superfícies de contacto, que se deve à deformação da própria madre e à grande rigidez do elemento que compõe o dispositivo de carregamento. Na seguinte figura, ilustra-se esse mesmo fenómeno:

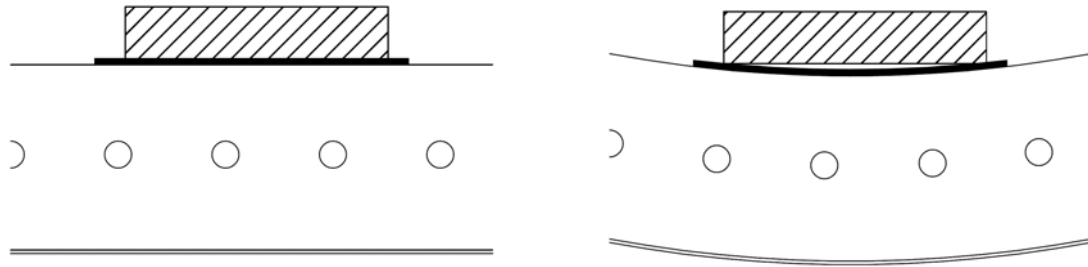


Figura 28 – Situação de carregamento: inicial e no decorrer do ensaio.

Relativamente a este ponto há a realçar a diferença entre a análise experimental e analítica, isto é, a nível de cálculo para obtenção dos diagramas de esforços, consideram-se os elementos carregados com uma carga perfeitamente pontual, o que na realidade é extremamente difícil de reproduzir e não traduz as situações reais de serviço.

Um dos pontos fundamentais da realização dos ensaios está relacionado com as condições de apoio das próprias madres. Tratando-se de uma análise experimental, foi necessário definir correctamente as condições de apoio a utilizar, uma vez que se trata de uma das variáveis de tipologia dos ensaios. Assim, e para criar os apoios simples, optou-se por colocar roletes metálicos sob os apoios permitindo qualquer tipo de rotação do mesmo. Quanto aos apoios duplos, estes foram conseguidos graças à utilização de uma meia-cana, capaz de permitir rotações do apoio, mas impedindo translações.

Para realizar o encastramento da madre, optou-se por aparafusar o apoio directamente ao pórtico de reacção, impedindo qualquer tipo de rotação ou translação.

A seguinte figura apresenta os diferentes apoios utilizados nos ensaios.

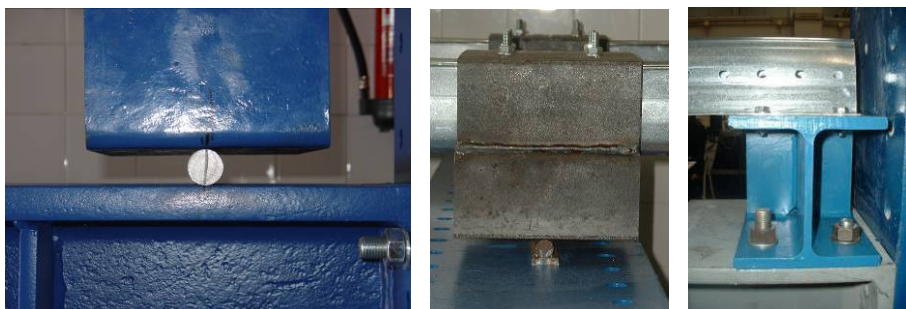


Figura 29 – Apoio simples, através de rolete metálico, apoio duplo, através de meia-cana e encastramento, por intermédio de ligação aparafusada ao pórtico de reacção.

A forma dos apoios depende da posição em que se encontra a madre, se o perfil MadreMax se encontrar na sua posição normal, ou seja, para ser carregado com cargas descendentes, o perfil que serviu de apoio foi do tipo H, caso a madre se encontre na sua posição invertida, o perfil de apoio escolhido foi do tipo tubular. Este perfil tubular também permite realizar ensaios com a madre colocada na face superior exterior, ou seja, com a madre na sua posição normal para receber cargas descendentes.

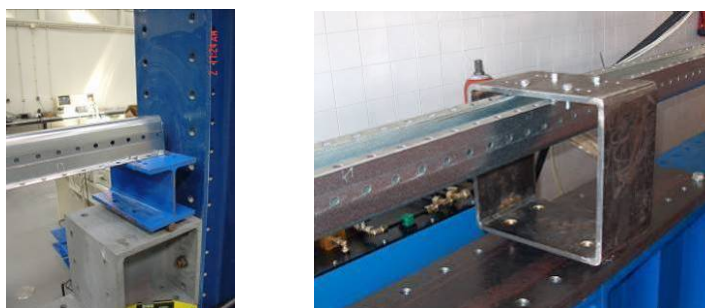


Figura 30 – Perfil de apoio do tipo H e do tipo tubular.

A ligação entre o elemento madre e os apoios realizou-se sempre por intermédio de parafusos M10 da classe 8.8 [16].

Um outro aspecto essencial para o correcto funcionamento do sistema de ensaio está relacionado com a precisão com que se mediram as distâncias e se marcaram os eixos das várias peças, sempre com a finalidade de garantir o mais correcto alinhamento possível. A colocação de instrumentos como os LVDT's, ou até mesmo a marcação dos pontos de carregamento da madre

requereram cuidados especiais no decorrer da montagem do sistema de ensaio. Contudo, e em alguns dos ensaios, devido aos limites físicos do pórtico de reacção não foi possível conceber um sistema isento de excentricidades como era desejado que, mesmo não sendo significativos, contribuíssem sempre para um resultado menos verosímil.

Para a análise e discussão dos resultados obtidos é importante referir que para além da carga que actua directamente sobre a madre, devem-se considerar também as restantes massas dos acessórios envolvidos no ensaio bem como o peso próprio das madres.

Tratando-se de um sistema de carregamento que envolve outros perfis e outros materiais, é importante mencionar que os valores registados, pelo medidor de deslocamentos interno do actuador, contabilizaram também as deformações desses acessórios, como as deformações da viga de carregamento, das tiras de neoprene, ou dos barrotes de madeira, para além da deformação da própria madre que se encontra em estudo.

As imperfeições geométricas dos elementos MadreMax contribuem de certa forma para os resultados finais dos ensaios, nessa perspectiva, realizaram-se apenas medições das imperfeições longitudinais das madres antes dos ensaios, essas imperfeições foram desprezadas, ora por se tratarem de valores praticamente nulos ou por se encontrarem dentro da tolerância máxima admissível preconizada na prEN 1090-2 [17].

Para concluir este ponto importa referir que em todos os ensaios, e quer se se tratasse de um ou dois actuadores, impôs-se uma velocidade no actuador de 0,02mm/seg.

2.5. Relatório de Ensaio

Para sintetizar toda a informação obtida de cada ensaio, procedeu-se à elaboração de um documento tipo, o qual permitisse reunir toda a informação possível desse mesmo ensaio, e ainda acompanhar o seu desenvolvimento. Esse documento tem como título *Relatório de Ensaio* e é a matriz de registo e anotações de todas as particularidades dos ensaios.

O *Relatório de Ensaio* encontra-se estruturado em sete partes distintas.

A primeira parte é destinada aos dados iniciais e é onde se apresentam as informações inerentes ao próprio ensaio, como o nome e tipo de ensaio, o local e a data de realização, o ficheiro de resultados e os técnicos envolvidos na sua realização.

A segunda parte é onde se apresenta o dispositivo do ensaio, essa apresentação faz-se por intermédio de um esquema ilustrativo no qual se mostra um alçado do sistema de ensaio.

Na terceira parte é onde se faz a descrição pormenorizada do ensaio, sendo seguida pela quarta parte onde se expõe um registo fotográfico retratando o desenvolvimento do ensaio e evidenciando os aspectos considerados mais importantes.

A quinta parte é onde se apresentam os resultados, que após tratamento resultam em gráficos que facilitam a leitura e compreensão.

A sexta parte é onde se encontram compiladas todas as notas e observações consideradas pertinentes e que podem explicar ou justificar o comportamento do elemento em teste.

Por fim, a sétima parte onde se retiram as conclusões do ensaio realizado.

Seguindo esta estruturação para cada ensaio, e reunindo todos os Relatórios de Ensaio de todos os ensaios foi possível concretizar um documento intitulado *Relatório de Ensaios I e II Fase* [18] que possibilita um conhecimento mais aprofundado e particularizado de cada ensaio realizado.

De seguida apresenta-se um *Relatório de Ensaio* por preencher, materializando assim a estruturação do dito documento.

ENSAIO N.º

1. Dados

Nome do Ensaio: _____

Ficheiro do Ensaio: _____

Data de Realização: _____

Hora de Realização: _____

Local de Realização: _____

Laboratório: _____

Técnicos: _____

2. Dispositivo de Ensaio

3. Descrição do Ensaio

4. Registos Fotográficos

5. Resultados

6. Notas e Observações

7. Conclusões

CAMPANHA EXPERIMENTAL

Capítulo 3

3.1. Apresentação geral dos ensaios

Os ensaios laboratoriais tratados ao longo desta dissertação foram englobados na terceira fase do projecto MadreMax, anteriormente abordado. Para uma melhor organização e distinção dos vários ensaios decidiu-se dividi-los em duas grandes fases.

A *I Fase de Ensaios* realizou-se no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural. Nesta fase concretizaram-se ensaios a perfis MadreMax com secção $\Omega 100 \times 1.5$, apenas com um vão, variando algumas das condições essenciais do ensaio, como as condições de apoio e o posicionamento da madre. Assim, os ensaios realizados nesta fase foram:

- *Ensaio de flexão simples, simplesmente apoiado, com cargas descendentes;*
- *Ensaio de flexão simples, encastrado com cargas descendentes;*
- *Ensaio de flexão simples, encastrado, simulando cargas ascendentes;*
- *Ensaio de flexão simples, simplesmente apoiado, simulando cargas ascendentes.*

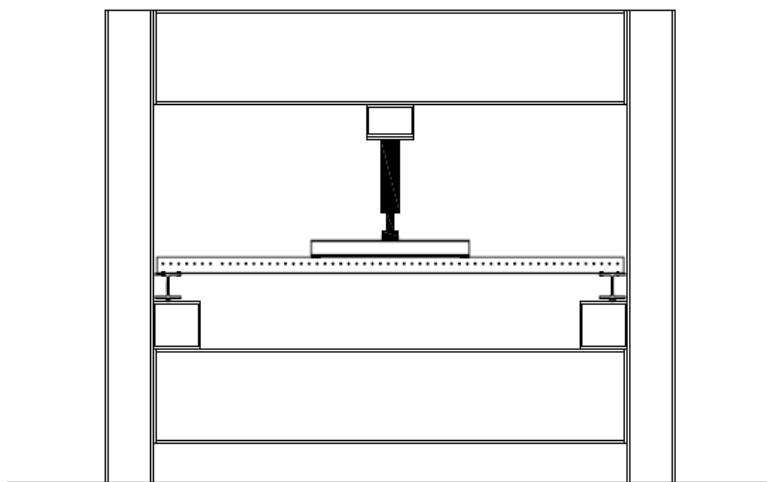


Figura 31 – Dispositivo tipo de ensaio - I Fase de Ensaios.

Quanto à *II Fase de Ensaios*, esta decorreu no LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, onde se realizaram os ensaios em continuidade, ensaios com dois vãos, para além da realização dos ensaios com a

aplicação de painel de cobertura unindo dois alinhamentos de madres. O perfil ensaiado foi novamente o MadreMax $\Omega 100 \times 1.5$, e os ensaios foram os seguintes:

- *Ensaio à flexão simples sem reforço da zona do apoio intermédio com cargas descendentes;*
- *Ensaio à flexão simples com reforço da zona do apoio intermédio com cargas descendentes;*
- *Ensaio à flexão simples sem reforço da zona do apoio intermédio com cargas ascendentes;*
- *Ensaio à flexão simples com reforço da zona do apoio intermédio com cargas ascendentes;*
- *Ensaio à flexão simples com reforço da zona do apoio intermédio com cargas ascendentes, e com aplicação de painéis de revestimento (do tipo sandwich) ligando dois alinhamentos de madres através de parafusos auto-perfurantes.*

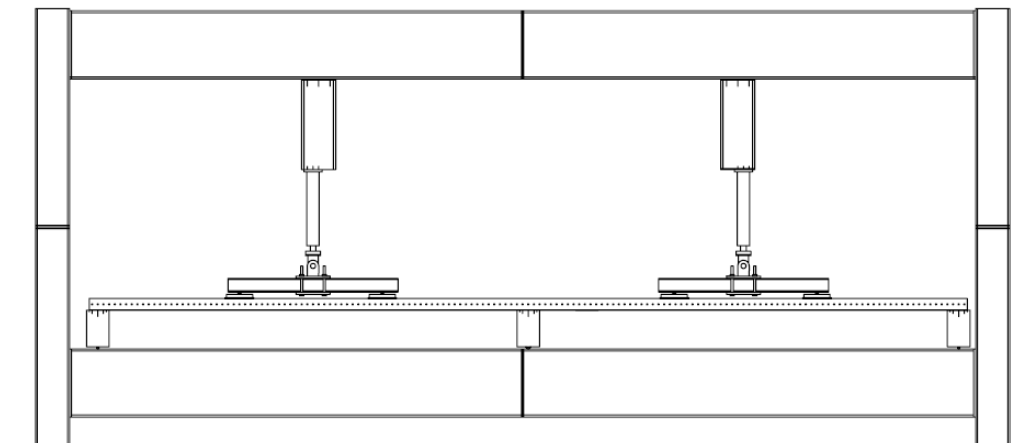


Figura 32 – Dispositivo tipo de ensaio - II Fase de Ensaio.

Estes ensaios visam demonstrar e retratar a realidade da aplicação dos perfis MadreMax possibilitando a compreensão do seu comportamento, quando sujeito a diversas situações de carregamento e condições de apoio. Para a realização dos ensaios, tiveram-se em consideração as várias especificações regulamentares [5], que já foram apresentadas no Sub-capítulo 2.1. desta dissertação.

Apesar das diversas secções existentes de perfis MadreMax, os ensaios realizados foram sempre em perfis $\Omega 100 \times 1.5$ [7, 8], devido às dimensões dos pórticos de reacção, que na *I Fase de Ensaio* apresentava um vão máximo a ensaiar de 3000mm e na *II Fase* de 8000mm. Esta secção permitiu uma correlação mais realista entre as condições reais de serviço e as dimensões das estruturas a ensaiar.

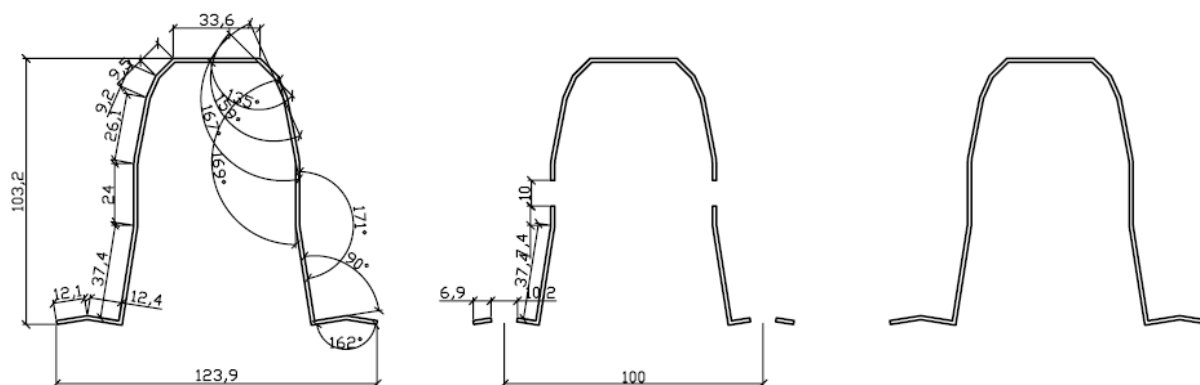


Figura 33 – Caracterização geométrica da secção $\Omega 100 \times 1.5$ [7].

De seguida apresentam-se de forma mais específica e pormenorizada os ensaios realizados nas duas fases de ensaios descritas.

3.1.1. Ensaio com um vão

Estes ensaios enquadram-se na *I Fase de Ensaio* atrás descrita e contam apenas com um vão de madre a ensaiar. Devido às dimensões existentes do pórtico de reacção (vão livre de 3000mm) o comprimento das madres testadas foi de 2950mm, contudo o vão que realmente interessava foi sempre menor que esse valor, na medida em que a quantificação métrica do vão é relativo à distância entre eixos dos perfis de apoio e não do comprimento total da madre, uma vez que o perfil contém longitudinalmente uma furação standard de 50 em 50mm [8, 10], o que restringe o posicionamento e ligação nos apoios.

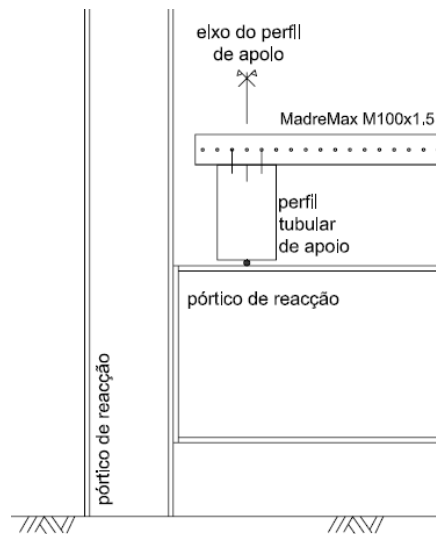


Figura 34 – Colocação da madre ao perfil de apoio.

No total foram realizados 16 ensaios nesta primeira fase, encontrando-se estes divididos em quatro grupos, anteriormente apresentados. Os ensaios são todos à flexão simples, encontrando-se os banzos livres do perfil, quer se trate da sua posição normal ou invertida, com uma inclinação de zero graus, relativamente aos apoios.

Relativamente ao modo de carregamento, este efectuou-se da seguinte forma:

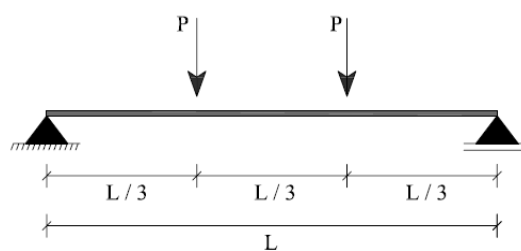


Figura 35 – Carregamento da madre.

Isto é, o carregamento realizou-se por intermédio de duas cargas pontuais localizadas a um terço do vão. O comprimento do vão dependeu do ensaio realizado e encontra-se especificado para cada ensaio.

De modo a se obter resultados verosímeis que traduzam a globalidade da situação a ensaiar, optou-se por se realizar pelo menos 2 repetições de ensaio, sendo feito um terceiro ensaio no caso dos resultados obtidos anteriormente diferirem substancialmente um do outro. Houve ainda espaço, nesta fase, de se recriarem outras condições de ensaio que estarão descritas e retratadas nesta dissertação bem como no documento *Relatório de Ensaaios I e II Fase* [18].

Ensaaios de flexão simples, simplesmente apoiados, com cargas descendentes

- ***Ensaio 1:*** Ensaio de flexão simples, com a madre na sua posição normal e simplesmente apoiada com recurso a roletes metálicos sob os apoios, com um vão real de 2799mm. Tratou-se de um ensaio teste, que serviu de base a todos os restantes, onde se definiu o dispositivo de carregamento pontual. Os resultados deste ensaio não foram tidos em consideração uma vez que se tratava de um ensaio teste.
- ***Ensaio 2:*** Ensaio de flexão simples, encontrando-se a madre na posição normal e simplesmente apoiada com recurso a roletes metálicos sob os apoios. Mais uma vez o vão real, ou seja, a distância entre os eixos dos apoios foi de 2799mm.
- ***Ensaio 3:*** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 2.
- ***Ensaio 5:*** Mais uma vez, este ensaio foi uma repetição do ensaio número 2.

Ensaaios de flexão simples, encastrados, com cargas descendentes

- ***Ensaio 4:*** Ensaio de flexão simples, encontrando-se a madre na posição normal e encastrada ao pórtico de reacção através de uma ligação aparafusada. A distância entre eixos dos apoios foi de 2799mm, novamente.
- ***Ensaio 6:*** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 4.
- ***Ensaio 7:*** Este ensaio foi também uma repetição do ensaio número 4.

Ensaio de flexão simples, encastrados, simulando cargas ascendentes

- **Ensaio 8:** Ensaio de flexão simples, com a madre na sua posição invertida e encastrada ao pórtico de reacção através de uma ligação aparafusada. O vão real do elemento foi de 2799mm.
- **Ensaio 9:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio anterior.
- **Ensaio 10:** Este ensaio também foi uma repetição do ensaio número 8.

Ensaio de flexão simples, simplesmente apoiados, simulando cargas ascendentes

- **Ensaio 11:** Ensaio de flexão simples, encontrando-se a madre na sua posição invertida. Para simular as condições de simplesmente apoiada utilizaram-se tirantes que ligados aos perfis de apoio conferiam tais condições de apoio à madre, contudo neste ensaio não foi introduzido qualquer tipo de guia para impedir os apoios de se deslocarem para fora do plano de ensaio. A distância entre os eixos dos apoios neste ensaio foi de 2700mm.
- **Ensaio 12:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 11, contudo foram introduzidas guias que impediram os perfis dos apoios de se deslocarem para fora do plano do ensaio.
- **Ensaio 13:** Este ensaio foi uma repetição do anterior, contudo não foram considerados os seus resultados na medida em que se verificaram excentricidades exageradas na aplicação das cargas e a consequente instabilização do sistema, não traduzindo correctamente a situação em estudo.
- **Ensaio 14:** Ensaio de flexão simples, mais uma vez com a madre na sua posição invertida. Desta vez, a simulação das condições de simplesmente apoiada foi conseguida através da utilização de um perfil tubular, no qual se encontrava ligada a madre pelo lado interior, com recurso a roletes metálicos sob os apoios, como o ilustra a figura 36. O vão real da madre em estudo foi de 2700mm.



Figura 36 – Perfil tubular no qual se apoia a madre na sua posição invertida.
Sob o perfil está colocado um rolete metálico.

- **Ensaio 15:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 14, exceptuando-se o facto do número de ligadores a utilizar na fixação da madre ao apoio, que neste caso passou de 4 parafusos M10 da classe 8.8 para 2 parafusos por ligação. Devido a esta variação no modo de ligação não foram considerados, a nível de discussão de resultados, os valores obtidos deste ensaio.

- **Ensaio 16:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio anterior, contudo foram colocadas duas chapas metálicas, próximas do ponto de aplicação das cargas, que uniam os banzos livres, como se mostra na figura 37. Para este ensaio os resultados não foram considerados, de igual modo como para o ensaio número 15.

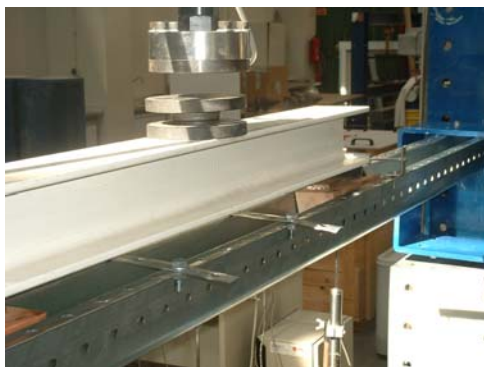


Figura 37 – Aplicação de chapas metálicas a unir os banzos livres do perfil.

Para um melhor entendimento e pormenorização destes ensaios sugere-se a leitura do *Relatório de Ensaios I e II Fase* [18].

3.1.2. Ensaio em continuidade – dois vãos

Os ensaios com madres em continuidade englobam-se na *II Fase de Ensaio*, utilizando dois vãos, verificando-se a continuidade no apoio central. Para a realização destes ensaios foi necessário um pórtico de reacção com um comprimento de vão livre superior, que no caso foi de 8000mm, admitindo um comprimento máximo de madre a ensaiar de 7750mm, mais uma vez devido à furação da madre e o posicionamento dos actuadores no pórtico.

Estes ensaios permitiram observar e analisar o comportamento do perfil aquando da aplicação das acções, bem como estudar a continuidade através da sobreposição das secções junto ao apoio central. Este comprimento de sobreposição foi de 1100mm, determinado através de um pré-dimensionamento expedito, sugerido em tabelas de pré-dimensionamento [10] do fabricante do perfil. Mais uma vez, a definição do comprimento real do vão foi referente à distância entre os eixos dos perfis que constituem os apoios às madres.

No total foram realizados 15 ensaios nesta segunda fase, encontrando-se estes divididos em cinco grupos. Os ensaios são todos à flexão simples, encontrando-se os banzos livres do perfil, quer se trate da sua posição normal ou invertida, com uma inclinação de zero graus, relativamente aos apoios, assim como sucedeu com os ensaios realizados na primeira fase.

O modo de carregamento foi efectuado da seguinte forma:

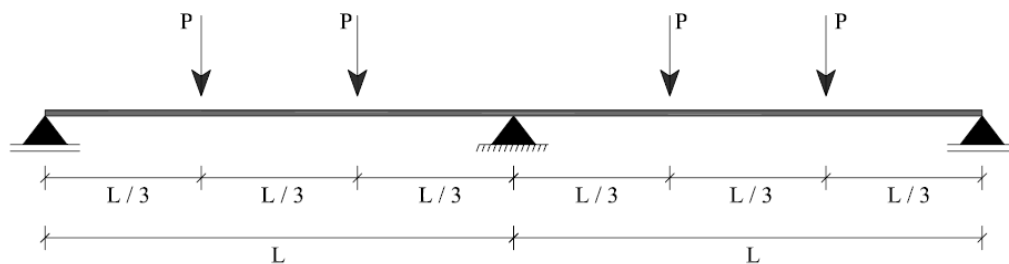


Figura 38 – Carregamento da madre.

Este tipo de carregamento é análogo ao efectuado nos ensaios da primeira fase, ou seja, cargas pontuais localizadas a um terço de cada vão. Para possibilitar este tipo de carregamento foi necessária a utilização de dois actuadores em simultâneo, em vez do único actuador utilizado nos ensaios da primeira fase.

O comprimento do vão dependeu do ensaio realizado e encontra-se especificado para cada ensaio.

Assim como nos ensaios da primeira fase, optou-se por se realizar, sempre que possível, 3 repetições de ensaio de forma a se obterem resultados representativos.

Para além dos ensaios em continuidade de um só alinhamento de madres, nesta fase realizaram-se ensaios com dois alinhamentos de madres em paralelo, unidos por painel do tipo sandwich de 30mm de espessura.

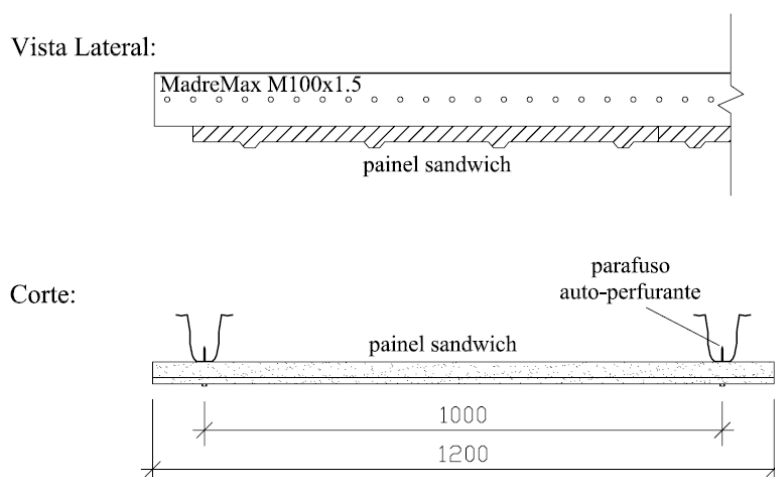


Figura 39 – Colocação do painel sandwich aos dois alinhamentos de madres.

Ensaio à flexão simples sem reforço da zona do apoio intermédio com cargas descendentes

- **Ensaio 1:** Ensaio de flexão simples com a madre sujeita a carregamento descendente (madre na posição normal), simplesmente apoiada através de roletes metálicos sob os apoios. A distância entre eixos de apoios foi de 3650mm, em ambos os vãos. Não foi aplicado reforço na zona do apoio central.

- **Ensaio 2:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 1.

- **Ensaio 3:** Este ensaio também foi uma repetição do ensaio número 1.

Ensaaios à flexão simples com reforço da zona do apoio intermédio com cargas descendentes

- **Ensaio 4:** Ensaio de flexão simples encontrando-se a madre na posição normal. A condição de apoio do tipo simplesmente apoiada foi assegurada por intermédio da colocação de roletes metálicos sob os apoios. O comprimento real de cada vão foi de 3650mm. Este ensaio é semelhante aos três ensaios anteriores, só que neste caso procedeu-se ao reforço por sobreposição de secções na zona do apoio central, sobreposição esta de 1100mm.

- **Ensaio 5:** Este ensaio é uma repetição do ensaio anterior.

- **Ensaio 6:** Este ensaio é uma repetição do ensaio número 4, contudo, neste caso utilizou-se um número superior de parafusos na zona da sobreposição.

Ensaaios à flexão simples sem reforço da zona do apoio intermédio com cargas ascendentes

- **Ensaio 7:** Ensaio de flexão simples com a madre na sua posição invertida, simulando assim cargas ascendentes, e simplesmente apoiadas através da utilização de roletes metálicos sob os apoios. A distância entre eixos de apoios foi de 3650mm, em ambos os vãos. Não foi aplicado reforço na zona do apoio central.

- **Ensaio 8:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 7.

- **Ensaio 9:** Este ensaio também foi uma repetição do ensaio número 7.

Ensaaios à flexão simples com reforço da zona do apoio intermédio com cargas ascendentes

- **Ensaio 10:** Ensaio de flexão simples encontrando-se a madre na posição invertida. A condição de apoio do tipo simplesmente apoiada foi assegurada por intermédio da colocação de roletes metálicos sob os apoios. O comprimento real de cada vão foi de 3650mm. Este ensaio é semelhante aos três ensaios anteriores, só que neste caso procedeu-se ao reforço por sobreposição de secções na zona do apoio central, sobreposição esta de 1100mm, como se ilustra na figura seguinte.

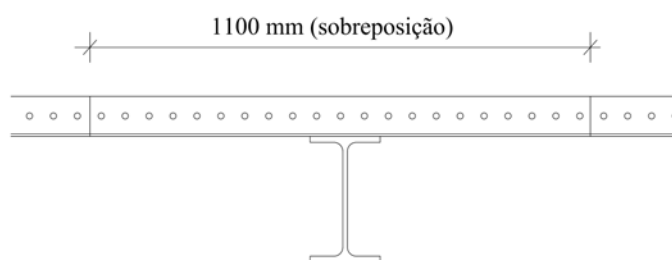


Figura 40 – Reforço por sobreposição de secções MadreMax.

- **Ensaio 11:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 10.

- **Ensaio 12:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 10, contudo, neste caso utilizou-se um número superior de parafusos na zona da sobreposição.

Ensaaios à flexão simples com reforço da zona do apoio intermédio com cargas ascendentes e com aplicação de painéis de revestimento (do tipo sandwich) ligando dois alinhamentos de madres através de parafusos auto-perfurantes.

- **Ensaio 13:** Ensaio de flexão simples com recurso ao reforço da zona sobre o apoio central através da sobreposição de secções, com a aplicação das cargas realizada de forma ascendente (madre na sua posição invertida). A ligar os dois alinhamentos de madres aplicou-se painel do tipo sandwich através de parafusos auto-perfurantes. Foi utilizado um dispositivo de carregamento que se revelou ser instável (ver figura 41), inviabilizando assim a obtenção de um resultado fidedigno. O comprimento de cada vão foi de 3650mm.



Figura 41 – Dispositivo de carregamento utilizado no ensaio 13 da II Fase.

- **Ensaio 14:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 13, só que desta vez com um dispositivo de carregamento mais rígido e estável (ver figura 42). Uma vez que no ensaio número 13 houve recuperação da forma inicial, aproveitaram-se as madres para se realizar o ensaio 14, porém o ponto de aplicação das cargas foi ligeiramente alterado de 20mm, relativamente ao ensaio 13, não se podendo ainda tomar os resultados deste ensaio como fidedignos;



Figura 42 – Dispositivo de carregamento utilizado no ensaio 14 da II Fase.

- **Ensaio 15:** Este ensaio foi uma repetição do ensaio número 14 com a utilização de novos perfis MadreMax.

Sugere-se, novamente, a leitura do *Relatório de Ensaaios I e II Fase* [18].

3.2. Previsão do comportamento experimental das madres

Antes da realização dos ensaios, e de modo a compreender os seus resultados e a evolução dos mesmos, procedeu-se a uma análise e a uma previsão do comportamento do elemento em teste. Para isso, o cálculo da carga máxima teórica a aplicar aos elementos, nos seus diversos ensaios, facilitou a avaliação geral do comportamento da madre em termos de resistência.

Em primeiro lugar é importante conhecer o tipo de aço utilizado para a fabricação dos perfis MadreMax. Este aço é do tipo estrutural e é denominado por S320 GD+Z/ZF, e apresenta uma tensão de cedência nunca inferior a 320MPa. Contudo este valor não é uma constante, podendo variar ao longo da chapa. A norma europeia que regula e trata este tema denomina-se por EN 10326 [12].

Existindo a possibilidade da chapa ter um valor de cedência superior à tensão teórica de 320MPa, houve a necessidade de se recorrer a ensaios destrutivos de tracção a provetes das chapas que deram origem aos perfis enformados a frio. Para cada lote de madres levadas para o laboratório, realizaram-se ensaios de tracção à chapa, obtendo assim um valor mais aproximado da tensão de cedência real. Para se distinguir, optou-se por designar tensão de cedência teórica ao valor base de 320MPa, e valor de tensão de cedência real ao valor obtido pelos ensaios de tracção dos provetes.

O cálculo das cargas máximas previstas para cada tipo de ensaio foi realizado por intermédio de um software de cálculo automático, determinando-se uma carga máxima de rotura para as diferentes tensões de cedência. Estes valores dizem respeito à rotura da secção transversal efectiva do elemento por perda da sua resistência, e não por qualquer outro fenómeno, como por exemplo, deformações excessivas ou fenómenos de instabilidade. A utilização da secção efectiva deve-se ao facto de se tratarem de perfis de classe 4.

De acordo com os registos do Laboratório que realizou os diversos ensaios de tracção, as tensões de cedência reais da chapa encontram-se sintetizadas na seguinte tabela:

Tabela 1 – Valores da tensão real de cedência da chapa.

<i>Fase de Ensaio</i>		<i>Tensão real de cedência (MPa)</i>
I Fase		360,0
II Fase	Ens. n.º 1 ao n.º 6	373,3
	Ens. n.º 7 ao n.º 15	383,4

Os valores das cargas máximas esperadas para os ensaios dependem, como é evidente, da distância entre os eixos dos apoios, da posição das cargas pontuais e da tensão de cedência do material. Mais à frente nesta dissertação serão apresentadas as cargas esperadas, tanto para a tensão de cedência de 320MPa como para a tensão real da chapa.

Indo ao encontro de um dos objectivos desta dissertação, era esperada a ocorrência de fenómenos de encurvadura, quer local quer global. Estes fenómenos de facto ocorreram na generalidade dos ensaios e encontram-se registados e evidenciados nos *Relatórios de Ensaios* [18].

Apresentam-se de seguida os esboços dos diagramas de Esforço Transverso e de Momentos Flectores para os ensaios realizados, para que seja possível prever o ponto mais crítico a partir do qual ocorre a rotura do perfil.

Assim, para os ensaios de um só vão (*I Fase de Ensaios*) com a madre simplesmente apoiada e para cargas descendentes, os diagramas de esforços são do tipo:

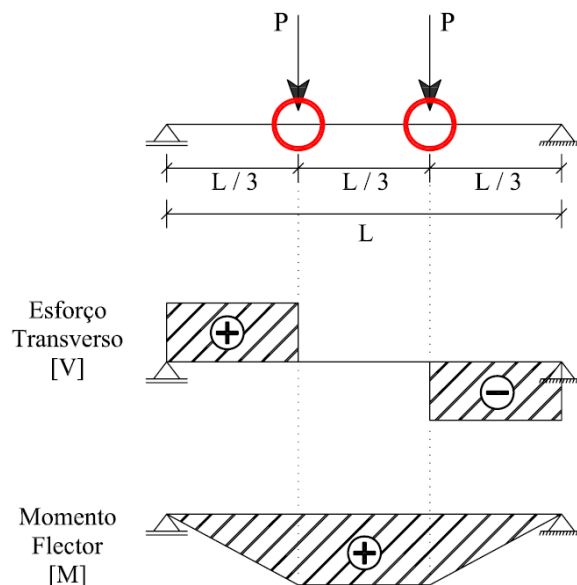


Figura 43 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transverso e momento-flector para um único vão, simplesmente apoiado e cargas descendentes.

Devido à conjugação do esforço transverso máximo e do momento-flector máximo no mesmo ponto, previu-se que a rotura se desse nesse mesmo local, ou seja, sob o ponto de aplicação das cargas (o local que se encontra assinalado na figura). Contudo, a rotura também poderá ocorrer entre os pontos de aplicação das cargas onde o momento-flector é máximo e constante e o esforço transverso é nulo. O local exacto onde se iniciará a rotura, dependerá, para além do que já foi dito, da estabilidade do sistema de ensaio, isto é, do alinhamento entre a madre e o dispositivo de carregamento ou até mesmo do próprio nivelamento da madre. Para cargas ascendentes (ou sua simulação), a previsão é análoga, uma vez que se verifica uma simetria nos diagramas de esforços, que de seguida se apresentam:

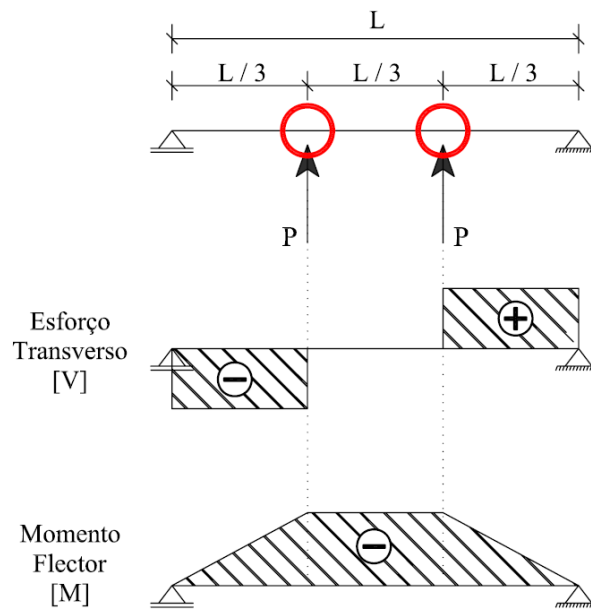


Figura 44 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transverso e momento-flector para um único vão, simplesmente apoiado e cargas ascendentes.

Continuando nos ensaios com apenas um vão (*I Fase de Ensaios*) mas encontrando-se a madre encastrada e com a aplicação de cargas realizada de forma descendente, o comportamento esperado a nível do local de rotura é um pouco distinto dos dois primeiros casos, uma vez que a concentração máxima de esforços ocorre junto aos apoios, razão suficiente para se prever nesse local o início da rotura do perfil.

Mais uma vez é de salientar que o alinhamento do sistema de carregamento com a madre influencia em muito o modo e o local de rotura

Os esboços dos diagramas de esforços para a situação de um vão, para condições de apoio do tipo encastramento, e para cargas descendentes e ascendentes, respectivamente, são:

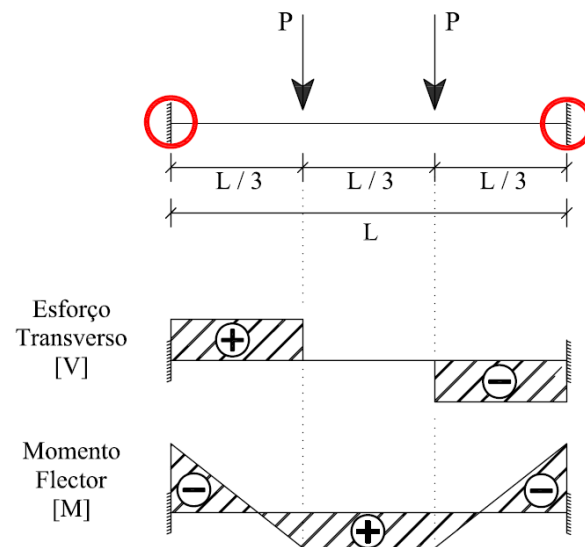


Figura 45 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transverso e momento-flector para um único vão, encastrado e cargas descendentes.

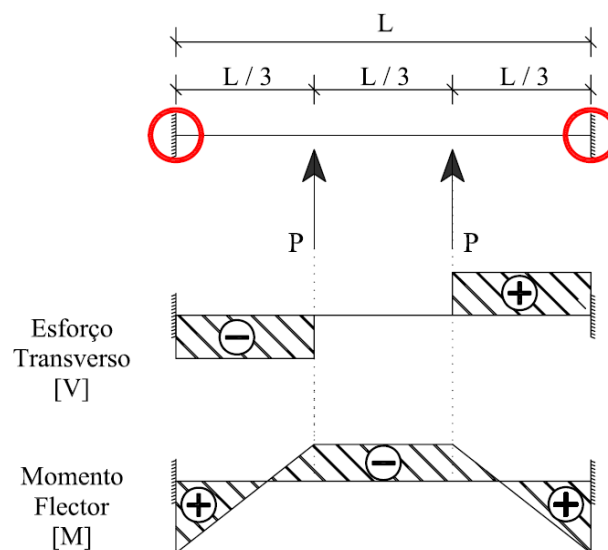


Figura 46 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transverso e momento-flector para um único vão, encastrado e cargas ascendentes.

Para os ensaios com dois vãos e simplesmente apoiados, a análise prévia efectuada baseia-se mais uma vez nos diagramas de esforços tipo, possibilitando uma previsão do comportamento experimental das madres.

Os diagramas que de seguida se apresentam pouco diferem na sua forma devido à existência ou não de reforço por sobreposição da zona sobre o apoio central, pelo que apenas se apresentam duas situações, referentes ao sentido de aplicação das cargas.

Para cargas descendentes, os diagramas tipo são os seguintes:

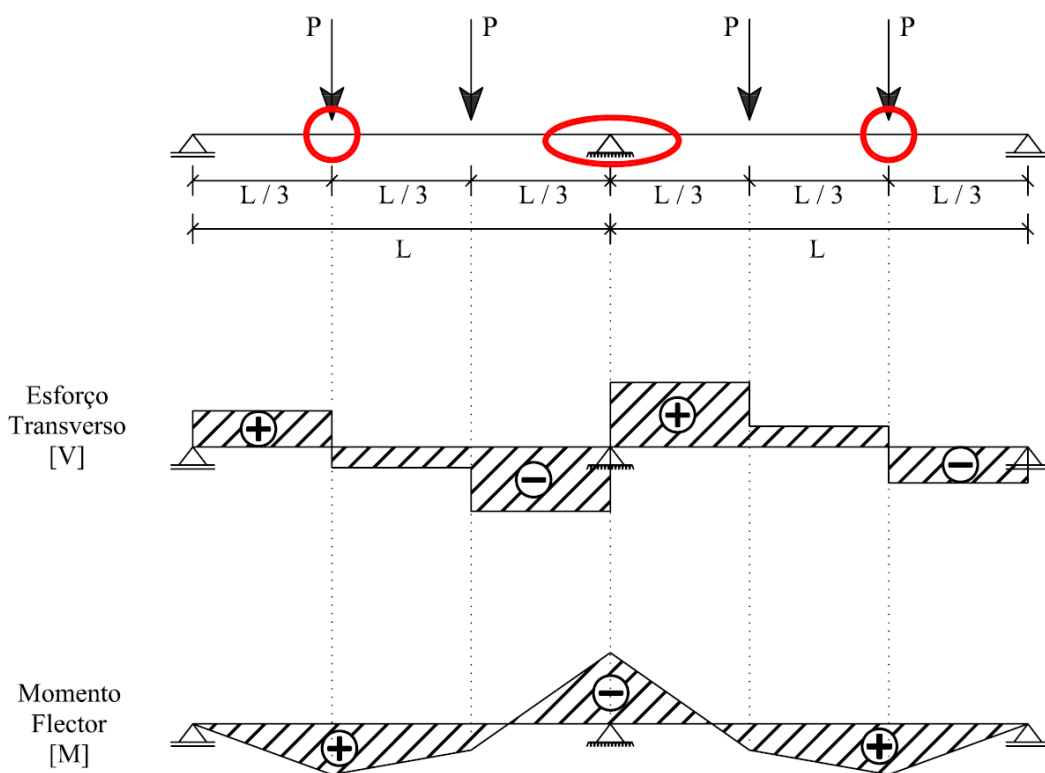


Figura 47 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transverso e momento-flector para dois vãos, simplesmente apoiados e cargas descendentes.

Neste tipo de situações há que distinguir dois casos, com e sem reforço na zona sobre o apoio central. Quando não estamos na presença desse reforço, a rotura ocorre claramente onde se verifica o esforço transverso e momento-flector máximo, ou seja, sobre o apoio central, como está assinalado, uma vez que ocorrem nesses locais os valores máximos desses esforços. Por sua vez, e

quando se está na presença da sobreposição, o local de rotura prevista deixa de ser sobre o apoio central, uma vez que agora existe uma duplicação de secção e consequentemente uma duplicação da resistência, passando para o ponto onde o momento-flector positivo é máximo, isto é, sob a aplicação da carga mais próxima do apoio extremo. Nesse ponto, a secção afigura-se simples e o momento-flector positivo é máximo, encontrando-se conjugado com o esforço transversal.

Para a situação contrária, cargas com sentido ascendente, a previsão do comportamento é análoga ao anteriormente descrito, no que respeita à resistência. Os diagramas de esforços tipo para essa modalidade de carregamento são os seguintes:

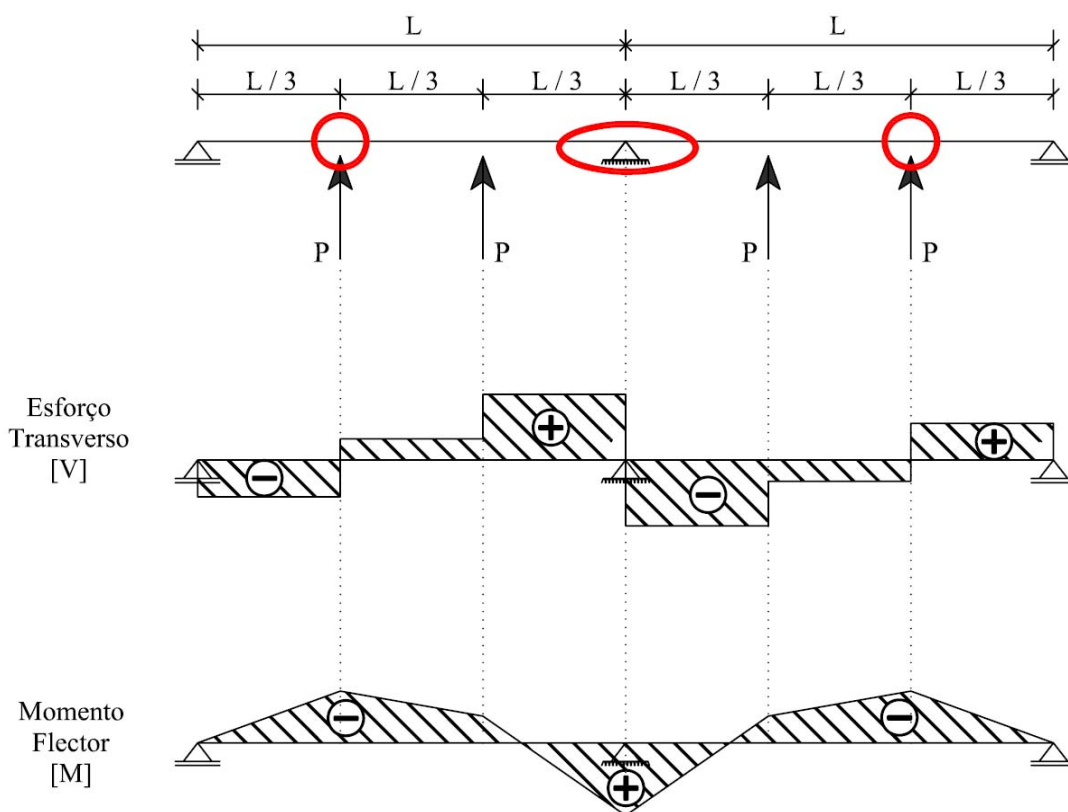


Figura 48 – Esboços dos diagramas de esforços: esforço transversal e momento-flector para dois vãos, simplesmente apoiados e cargas ascendentes.

Ainda relativo à encurvadura, prevê-se a sua existência de forma mais consistente nas situações de carregamento ascendente, uma vez que os banzos livres do perfil se encontram sujeitos à

compressão, propiciando assim a ocorrência de fenómenos de instabilidades locais, agravadas ainda pela presença da furação que existe nesses mesmos banzos, que reduz a resistência à torção das madres.

3.3. Resultados obtidos

Os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados resultam de um tratamento dos dados fornecidos pelo software *DynaTester* [15]. Este software apresenta, em formato de tabela, as diferentes grandezas que variam com o decorrer do ensaio. As grandezas quantificadas permitem posteriormente uma apresentação gráfica.

Como já se disse, a apresentação do valor das grandezas surge em tabelas e contempla os seguintes parâmetros:

Tabela 2 – Apresentação das grandezas contabilizadas no decorrer do ensaio.

Tempo	Desl_Act583	Força_Act583	LVDT94200	LVDT94201	LVDT94389	LVDT94388	Procedimento	Ciclo
0:00:00,00	0	0	0,001	0,001	-0,002	0	0	0
0:00:00,20	-0,01	0	0,004	0,001	-0,002	-0,008	0	0
0:00:00,40	0	0,003	0,007	0,002	-0,006	-0,017	0	0
0:00:00,60	-0,01	-0,006	0,004	0,001	-0,008	-0,011	0	0
0:00:00,80	-0,01	0	0,001	-0,001	-0,011	-0,009	0	0
0:00:01,00	0	0,006	0,004	-0,001	-0,022	-0,024	0	0
0:00:01,20	0,01	0,006	0,005	0,002	-0,024	-0,035	0	0
0:00:01,40	0,03	0,012	0,004	0,002	-0,025	-0,025	0	0
0:00:01,60	0,01	0,009	0,002	0,001	-0,035	-0,03	0	0
0:00:01,80	0,03	0,015	0,003	0,001	-0,04	-0,042	0	0
0:00:03,40	0,06	0,03	0,005	0,001	-0,079	-0,08	0	0
...
0:57:17,46	68,74	8,048	18,622	15,544	3,134	4,702	0	0
0:57:17,66	68,75	8,051	18,62	15,545	3,138	4,696	0	0
0:57:17,86	68,74	8,057	18,62	15,546	3,138	4,699	0	0
0:57:18,06	68,75	8,051	18,621	15,546	3,14	4,694	0	0
0:57:18,26	68,74	8,042	18,62	15,544	3,14	4,699	0	0
0:57:18,46	68,76	8,048	18,621	15,544	3,137	4,709	0	0
0:57:18,66	68,76	8,054	18,62	15,543	3,14	4,701	0	0
0:57:18,86	68,76	8,042	18,62	15,544	3,138	4,701	0	0

As várias grandezas são registadas com intervalos de tempo muito reduzidos, como se pode observar, sendo apresentada na primeira coluna precisamente a grandeza **Tempo**. A segunda coluna, **Desl_Act583**, diz respeito aos valores de deslocamentos verticais medidos pelo LVDT interno do actuador em causa, sendo-lhe seguida a coluna da **Força_Act583** que quantifica para cada instante o valor da força que o actuador aplica ao elemento em teste. As restantes 4 colunas dizem respeito aos valores dos deslocamentos relativos verticais e horizontais dos LVDT's que se colocaram ao longo da madre em estudo. Estes valores permitem aferir, por exemplo, o deslocamento vertical de um dos banzos livres relativamente ao outro, ou ainda quantificar a

abertura relativa da madre. As restantes colunas estão referenciadas ao procedimento e ciclo com que o software regista os dados.

Cada ensaio está associado a uma tabela, a qual permite correlacionar graficamente as diversas grandezas. No presente caso optou-se por colocar os deslocamentos, fornecidos pelos vários LVDT's, em função da força, como se pode observar nos gráficos seguintes que pretendem ser exemplificativos.

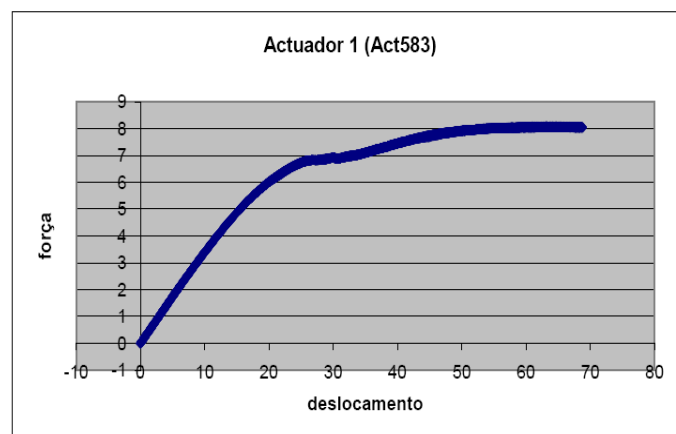


Figura 49 – Força – deslocamento (KN/mm) -pelo LVDT interno do actuador.

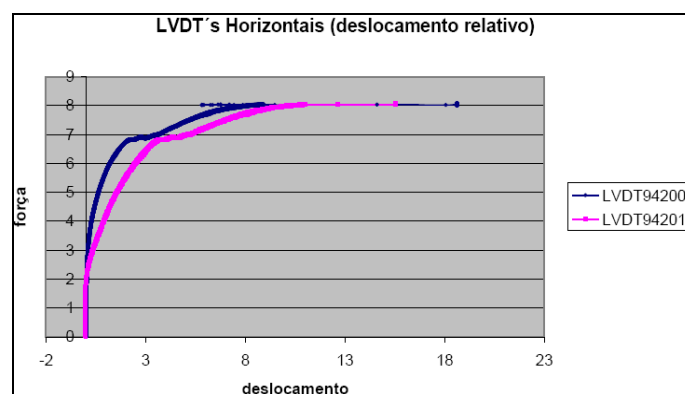


Figura 50 – Força – deslocamento (KN/mm) - pelos LVDT's colocados para quantificar deslocamentos relativos horizontais.

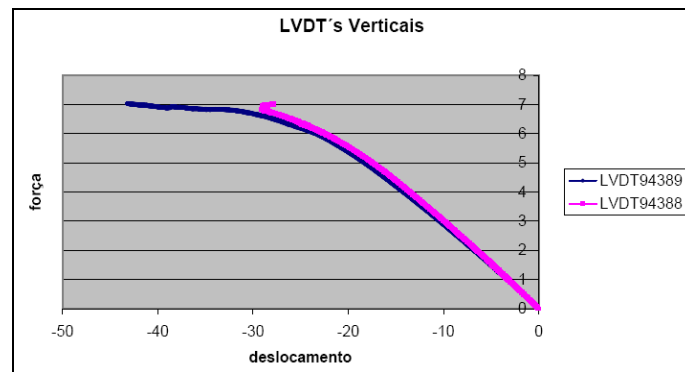


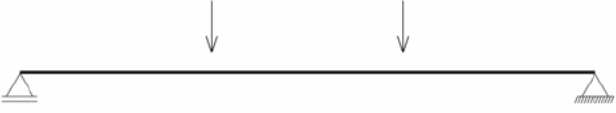



Figura 51 – Força – deslocamento (KN/mm) - pelos LVDT's colocados para quantificar deslocamentos verticais.

É de referir que no documento *Relatório de Ensaios I e II Fase* [18] encontram-se expostos todos os gráficos e constatações relativos a cada ensaio realizado.

Os resultados obtidos dos ensaios encontram-se expostos individualmente sendo depois realizada uma média desses valores, a qual permite a posterior análise e discussão.

Apresentam-se de seguida as tabelas resumo que contêm os resultados dos diferentes ensaios. Estas resultam do tratamento anteriormente referido, encontrando-se em oposição aos valores esperados, que foram abordados no sub-capítulo anterior. Os resultados expostos apenas dizem respeito aos ensaios considerados válidos.



Tabela 3 – Tabela resumo de resultados da I Fase de Ensaio.

<i>Ensaio</i>	<i>Situação de Apoio</i>	<i>Cargas de Rotura</i>
Ensaio 2	<i>simplesmente apoiado - cargas descendentes</i> 	9,9 kN
Ensaio 3		10,3 kN
Ensaio 5		9,7 kN
		<i>Média:</i> 10,0 kN
		<i>Valor Experimental Esperado (*):</i> 7,2 kN
		<i>Valor Analítico (**):</i> 6,4 kN
Ensaio 4	<i>encastado - cargas descendentes</i> 	12,9kN
Ensaio 6		13,4kN
Ensaio 7		14,1 kN
		<i>Média:</i> 13,5 kN
		<i>Valor Experimental Esperado (*):</i> 10,7 kN
		<i>Valor Analítico (**):</i> 9,6 kN
Ensaio 8	<i>encastado - cargas ascendentes</i> 	10,8 kN
Ensaio 9		11,3 kN
Ensaio 10		11,6 kN
		<i>Média:</i> 11,2 kN
		<i>Valor Experimental Esperado (*):</i> 10,7 kN
		<i>Valor Analítico (**):</i> 9,6 kN
Ensaio 11	<i>simplesmente apoiado - cargas ascendentes</i> 	6,9 kN
Ensaio 12		7,1 kN
Ensaio 14		7,1 kN
		<i>Média:</i> 7,0 kN
		<i>Valor Experimental Esperado (*):</i> 7,2 kN
		<i>Valor Analítico (**):</i> 6,4 kN

(*) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 360 MPa - média dos ensaios mecânicos à chapa.

(**) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 320 MPa - valor de dimensionamento.



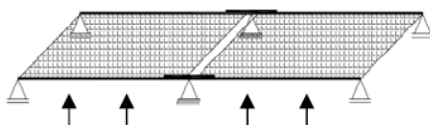
Tabela 4 – Tabela resumo de resultados da II Fase de Ensaio.**Tabela Resumo: cargas descendentes**

Esquema estrutural	Ensaio	Cargas de Rotura (kN)	
		Actuador 1	Actuador 2
2 vãos sem reforço - cargas descendentes 	Ensaio 1	8,8	8,8
	Ensaio 2	9,7	9,0
	Ensaio 3	8,9	8,4
	Média dos ensaios 1, 2 e 3:	8,9	
	Valor Esperado (*):	6,0	
	Valor Analítico (**):	5,1	
2 vãos com reforço - cargas descendentes 	Ensaio 4	10,0	10,0
	Ensaio 5	10,2	9,8
	Média dos ensaios 4 e 5:	10,0	
	Ensaio 6	10,3	10,8
	Média do ensaio 6:	10,6	
	Valor Esperado (*):	9,9	
	Valor Analítico (**):	8,5	

(*) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 373,3 MPa - média dos ensaios mecânicos à chapa.

(**) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 320 MPa - valor de dimensionamento.

Tabela Resumo: cargas ascendentes

Esquema estrutural	Ensaio	Cargas de Rotura (kN)	
		Actuador 1	Actuador 2
2 vãos sem reforço - cargas ascendentes 	Ensaio 7	6,8	6,5
	Ensaio 8	6,4	6,3
	Ensaio 9	6,6	6,6
	Média dos ensaios 7, 8 e 9:	6,5	
	Valor Esperado (*):	6,4	
	Valor Analítico (**):	5,1	
2 vãos com reforço - cargas ascendentes 	Ensaio 10	7,8	8,0
	Ensaio 11	7,8	8,0
	Média dos ensaios 10 e 11:	7,9	
	Ensaio 12	8,1	8,1
	Média do ensaio 12:	8,1	
	Valor Esperado (*):	10,1	
	Valor Analítico (**):	8,5	
2 vãos com reforço - cargas ascendentes e com aplicação de painel 	Ensaio 15	9,7	8,6
	Média do ensaio:	9,2	
	Valor Esperado (*):	10,0	
	Valor Analítico (**):	8,3	

(*) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 383,4 MPa - média dos ensaios mecânicos à chapa.

(**) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 320 MPa - valor de dimensionamento.

3.4. Análise e discussão dos resultados

Tendo por base os resultados anteriores, a primeira análise a realizar-se diz respeito à superação, ou não, da carga experimental quando comparada com os valores obtidos pelos cálculos previamente realizados.

Relativamente aos ensaios da I Fase, a carga atingida nos ensaios laboratoriais é sempre superior às cargas calculadas analiticamente, tanto para a tensão de cedência base de 320MPa como para a tensão real, independentemente do sentido de aplicação das cargas, exceptuando-se unicamente um caso do ensaio simplesmente apoiado com aplicação ascendente das cargas, uma vez que para a tensão de cedência real, que nesse caso é de 360MPa, a carga esperada é superior à atingida no ensaio, não ficando assegurada a resistência para este tipo de ensaio, embora para uma margem muito reduzida.

Relativamente aos ensaios da segunda fase, verifica-se um número maior de não conformidades, quer ao nível particular de cada ensaio, ou seja, a nível de cada repetição, quer ao nível global do ensaio, incluindo a média do conjunto das repetições. Nos ensaios com cargas descendentes, sem aplicação de sobreposição sobre a zona do apoio central, os valores experimentais superam os analíticos, não apresentando por isso qualquer inconformidade relativamente à resistência do perfil. Para os ensaios que apresentam reforço por sobreposição da zona sobre o apoio central e com aplicação de cargas descendentes, apenas não se encontra superada a carga referente à tensão real da chapa, isto apenas para uma das repetições, isto é, o ensaio número 5, verificando-se para as outras situações uma superação da carga experimental perante as analíticas.

Algo de muito semelhante sucede com os ensaios sem reforço e com cargas ascendentes em que é verificada a resistência da madre na globalidade dos ensaios, para ambas as tensões, contudo, num ensaio em particular e para a carga referente à tensão de cedência real, o valor atingido pelo actuador é inferior ao valor esperado, no que diz respeito ao ensaio número 8.

Quanto aos ensaios com aplicação de reforço e com aplicação de cargas ascendentes a resistência não se encontra garantida, na medida em que os valores de carga experimentais são inferiores aos calculados e esperados, independentemente do tipo de tensão utilizada.

Deve referir-se, no entanto, que em situações reais de obra, esta é uma situação que dificilmente ocorrerá. De facto a acção ascendente do vento, pressupõe a existência de chapas de cobertura, as quais conferem sempre um certo grau de contraventamento. Esta situação foi simulada no ensaio

número 15 (II Fase) em que a carga máxima prevista apenas não foi superada por uma margem de 8%, valor que estaria coberto com a utilização de um coeficiente de segurança de $\gamma_{M0} = 1,1$.

Para sintetizar as informações anteriores, apresentam-se de seguida as tabelas 5 e 6 que resumem, para cada ensaio válido, as verificações da segurança [19]. Estas verificações são feitas comparando os valores obtidos experimentalmente com os valores esperados (tanto para o valor de tensão de cedência real da chapa, f_y , como para o valor de tensão de cedência real da chapa dividido por um factor de segurança $\gamma_{M0} = 1,1$).

Tabela 5 – Verificação da segurança – I Fase de Ensaios.

<i>Ensaio</i>		<i>Cargas de Rotura (kN)</i>	<i>Segurança (f_y)</i>	<i>Segurança (f_y/γ_{M0})</i>
<i>simplesmente apoiado - cargas descendentes</i>	Ensaio 2	9,9	1,4	1,5
	Ensaio 3	10,3	1,4	1,6
	Ensaio 5	9,7	1,3	1,5
	Média dos ensaios 2, 3 e 5:	10,0	1,4	1,5
	Valor Esperado com f_y (*):	7,2		
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	6,5		
<i>encastrado - cargas descendentes</i>	Ensaio 4	12,9	1,2	1,3
	Ensaio 6	13,4	1,3	1,4
	Ensaio 7	14,1	1,3	1,4
	Média dos ensaios 4, 6 e 7:	13,5	1,3	1,4
	Valor Esperado com f_y (*):	10,7		
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	9,7		
<i>simplesmente apoiado - cargas ascendentes</i>	Ensaio 11	6,9	1,0	1,1
	Ensaio 12	7,1	1,0	1,1
	Ensaio 14	7,1	1,0	1,1
	Média dos ensaios 11, 12 e 14:	7,1	1,0	1,1
	Valor Esperado com f_y (*):	7,2		
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	6,5		
<i>encastrado - cargas ascendentes</i>	Ensaio 8	10,8	1,0	1,1
	Ensaio 9	11,3	1,1	1,2
	Ensaio 10	11,6	1,1	1,2
	Média dos ensaios 8, 9 e 10:	11,2	1,0	1,2
	Valor Esperado com f_y (*):	10,7		
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	9,7		

(*) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 360 MPa - média dos ensaios mecânicos à chapa

(**) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 360 MPa a dividir por um factor de segurança de $\gamma_{M0}=1.1$

Tabela 6 – Verificação da segurança – II Fase de Ensaios.

Ensaio		Cargas de Rotura (kN)		Segurança (f_y)		Segurança (f_y/γ_{M0})	
		Actuador 1	Actuador 2	Actuador 1	Actuador 2	Actuador 1	Actuador 2
2 vãos sem reforço - cargas descendentes	Ensaio 1	8,8	8,8	1,5	1,5	1,6	1,6
	Ensaio 2	9,7	9,0	1,6	1,5	1,8	1,7
	Ensaio 3	8,9	8,4	1,5	1,4	1,6	1,5
	Média dos ensaios 1, 2 e 3:	8,9		1,5		1,6	
	Valor Esperado com f_y (*):	6,0					
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	5,5					
2 vãos com reforço - cargas descendentes	Ensaio 4	10,0	10,0	1,0	1,0	1,1	1,1
	Ensaio 5	10,2	9,8	1,0	1,0	1,1	1,1
	Média dos ensaios 4 e 5:	10,0		1,0		1,1	
	Ensaio 6	10,3	10,8	1,0	1,1	1,1	1,2
	Média do ensaio 6:	10,6		1,1		1,2	
	Valor Esperado com f_y (*):	9,9					
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	9,0					

(*) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 378 MPa - média dos ensaios mecânicos à chapa

(**) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 378 MPa a dividir por um factor de segurança de $\gamma_{M0}=1.1$

Ensaio		Cargas de Rotura (kN)		Segurança (f_y)		Segurança (f_y/γ_{M0})	
		Actuador 1	Actuador 2	Actuador 1	Actuador 2	Actuador 1	Actuador 2
2 vãos sem reforço - cargas ascendentes	Ensaio 7	6,8	6,5	1,1	1,0	1,2	1,1
	Ensaio 8	6,4	6,3	1,0	1,0	1,1	1,1
	Ensaio 9	6,6	6,6	1,0	1,0	1,1	1,1
	Média dos ensaios 7, 8 e 9:	6,5		1,1		1,1	
	Valor Esperado com f_y (*):	6,4					
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	5,8					
2 vãos com reforço - cargas ascendentes	Ensaio 10	7,8	8,0	0,8	0,8	0,8	0,9
	Ensaio 11	7,8	8,0	0,8	0,8	0,8	0,9
	Média dos ensaios 10 e 11:	7,9		0,8		0,9	
	Ensaio 12	8,1	8,1	0,8	0,8	0,9	0,9
	Média do ensaio 12:	8,1		0,8		0,9	
	Valor Esperado com f_y (*):	10,1					
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	9,2					
2 vãos com reforço - cargas ascendentes e com aplicação de painel	Ensaio 15	9,7	8,6	1,0	0,9	1,1	0,9
	Média do ensaio 13:	9,2		0,9		1,0	
	Valor Esperado com f_y (*):	10,0					
	Valor Esperado com f_y/γ_{M0} (**):	9,1					

(*) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 383.4 MPa - média dos ensaios mecânicos à chapa

(**) Valores para uma tensão de cedência da chapa de 383.4 MPa a dividir por um factor de segurança de $\gamma_{M0}=1.1$

Verificou-se na maioria dos ensaios encurvadura lateral torcional, sendo mais evidenciado nos ensaios da segunda fase. A figura 52 traduz a referida rotação.



Figura 52 – Pormenor da rotação da secção do perfil MadreMax no decorrer de um ensaio.

Quando a acção sobre a madre é realizada com sentido ascendente, os banzos livres ficam sujeitos a compressão, e por isso com propensão a sofrer encurvadura local, formando-se vincos bem definidos.



Figura 53 – Pormenor da formação de um vinco – banzo livre sujeito à compressão.

Contudo, quando as cargas que actuam na madre são descendentes, os banzos livres ficam sujeitos a esforços de tracção, que em alguns casos levou mesmo à rotura por tracção, junto da furação, como se evidencia na figura 54.



Figura 54 – Rotura – banzo livre sujeito à tracção.

Apesar disso, também se observou num dos ensaios a formação de um vinco numa das almas da madre, sendo este associado a cargas descendentes e a fenómenos de encurvadura local da alma sujeita a flexão. É ainda de referir que, na generalidade dos casos, os locais da formação destes vincos, ou seja, dos pontos mais frágeis e que originam a perda de resistência do elemento, vão ao encontro dos locais previstos no sub-capítulo 3.2.

Quanto ao comportamento força – deslocamento, evidencia-se em todos os casos uma fase elástica, característica deste tipo de secções de classe 4. Contudo, e no caso de cargas descendentes, é mais comum observar-se a formação de um patamar de cedência, algo que não é tão evidente para situações de cargas ascendentes, em que a perda de resistência ocorre de forma mais súbita. O comportamento elástico deste tipo de perfis é revelado no instante da descarga, onde a madre recupera significativamente a sua forma inicial.

É importante referir que os elementos que, no decorrer do seu processo de fabrico, sofram quinagens [5], como é o caso da MadreMax, encorparam em si uma resistência adicional, resultante do endurecimento por deformação, que no cálculo não foi tida em consideração. Também é de referir que os valores das deformações quantificadas pelo LVDT interno do actuador entram em conta com as deformações dos acessórios envolvidos no carregamento, como a deformação da própria viga que executa a distribuição das cargas, ou até mesmo a deformação das tiras de neoprene envolvidas nos mesmos dispositivos.

Como já foi anteriormente referido nesta dissertação, nem sempre foi possível originar um sistema de ensaio isento de imperfeições. Questões como o alinhamento da madre com o dispositivo de carga e os actuadores, ou o nivelamento da própria madre nem sempre foram possíveis garantir a cem por cento, o que de algum modo influencia os resultados obtidos.

De seguida apresenta-se a tabela que contempla as massas de todos os acessórios que de uma forma indirecta contribuem para o carregamento do elemento.

Tabela 7 – Massas dos acessórios utilizados nos ensaios

<i>Ensaio N.º</i>		<i>Massa dos acessórios (*)</i>
<i>I Fase de Ensaios - Universidade do Porto</i>	2	38,675 Kg
	3	38,675 Kg
	5	41,202 Kg
	4	38,675 Kg
	6	38,675 Kg
	7	38,675 Kg
	8	39,820 Kg
	9	39,820 Kg
	10	39,820 Kg
	11	39,820 Kg
	12	39,820 Kg
	14	39,820 Kg
<i>II Fase de Ensaios - Universidade de Aveiro</i>	1	75,820 Kg
	2	75,820 Kg
	3	75,820 Kg
	4	77,220 Kg
	5	77,220 Kg
	6	77,220 Kg
	7	75,340 Kg
	8	75,340 Kg
	9	75,340 Kg
	10	76,740 Kg
	11	76,740 Kg
	12	76,740 Kg
	15	178,840 Kg

(*) já contabiliza o peso próprio do elemento em teste

METODOLOGIA DE CÁLCULO BASEADA NO EC3

Capítulo 4

4.1. Apresentação da metodologia de cálculo

Tratando-se os perfis MadreMax de secções muito particulares, onde as quinagens desempenham um papel importante na resistência da secção e onde os comportamentos só agora são estudados e conhecidos, houve a necessidade de adaptar uma metodologia de cálculo, proposta pelo EC3 parte 1-3 para os perfis enformados a frio do tipo Z [20, 21], aos perfis do tipo MadreMax. Esta metodologia de cálculo encontra-se por isso baseada na parte 1-3 do EC3 [5] e advém de um método de cálculo dos perfis Z, uma vez que é possível aproximar uma secção do perfil MadreMax a duas secções Z colocadas opostamente.

Partindo deste premissa apresenta-se o procedimento de cálculo:



Figura 55 – Decomposição da secção MadreMax em duas secções Z.

As secções MadreMax, por possuírem o centro de corte localizado no eixo de simetria da secção não têm tendência a rodar como acontece nos perfis com secção C, Σ , e Z.

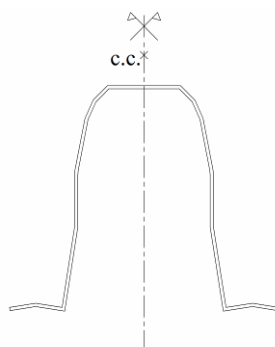


Figura 56 – Secção Ω MadreMax.

De facto as madres **C** e **Σ** , por usualmente possuírem o centro de corte fora do eixo de solicitação, estão sujeitas a torção, que resultará numa possível rotação como se mostra na seguinte figura.

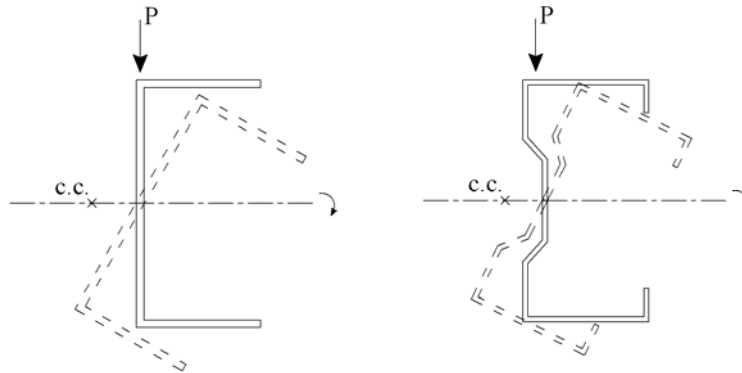


Figura 57 – Localização do centro de corte nos perfis **C** e **Σ** .

Por outro lado, a secção **Z**, quando solicitada verticalmente no plano da alma, não deveria rodar, como acontece com os dois perfis anteriores, visto que usualmente o centro de corte coincide com o baricentro desta secção. No entanto, como os eixos principais de inércia são oblíquos, a secção carregada verticalmente estará sujeita a flexão desviada, provocando uma deformação que terá componente nas duas direcções (horizontal e vertical), como se mostra na figura seguinte.

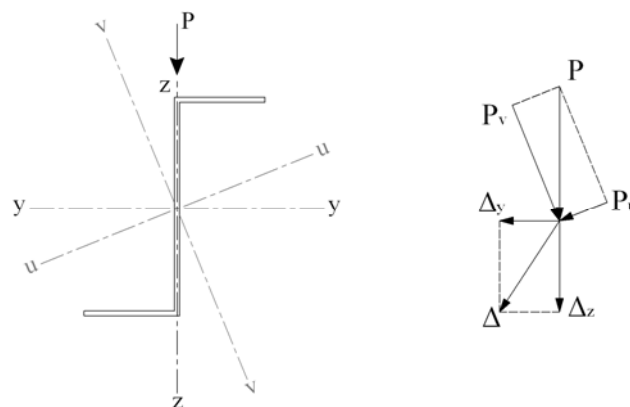


Figura 58 – Eixos principais de inércia na secção **Z** e deformação sofrida por uma madre flectida.

Assim, se a madre flexa na direcção horizontal, a carga aplicada verticalmente também se move com a madre, que, estando fixa nos apoios, provoca ou aumenta a torção existente, devido a estas deformações, reduzindo assim a capacidade de carga da madre.

As madres MadreMax, não possuem esta tendência para rodar dispensando a utilização de tirantes de contraventamento necessários nas madres **C**, **Σ** e **Z**.



Figura 59 – Tirantes de contraventamento.

Relativamente à verificação de segurança, adoptar-se-á a *Cláusula 10* da EN1993-1-3 [5], desprezando-se na expressão considerada a parcela correspondente ao momento-flector no banzo livre, pois como se viu o perfil MadreMax tem o centro de corte localizado no eixo de simetria. Também na expressão da resistência à encurvadura do banzo livre se despreza aquela parcela pelas mesmas razões.

Assim, as expressões gerais aplicadas para a verificação da resistência serão:

para a verificação da resistência da secção transversal:

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (1)$$

para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre:

$$\sigma_{Ed} = \frac{1}{\chi_{LT}} \times \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

Segundo o Eurocódigo 3, Parte 1-3 [5], devem ser verificadas as seguintes condições para que seja possível aplicar a Clausula 10, já referenciada.

$$\frac{h}{t} < 233 \quad \text{e} \quad \frac{c}{t} \leq 20 \quad (3)$$

Sendo h a altura da secção em estudo, t a espessura e c o comprimento de uma aba habitualmente considerada em secções comuns **Z** mas que nas secções **Ω** MadreMax não existe.

Note-se que, pelo que já foi dito, as propriedades mecânicas da secção (brutas e efectivas) dizem respeito a apenas metade da secção **Ω**, podendo assim adoptar-se os procedimentos de cálculo preconizados na *Cláusula 10* da Parte 1.3 do Eurocódigo 3 [5], para este tipo de secção transversal.

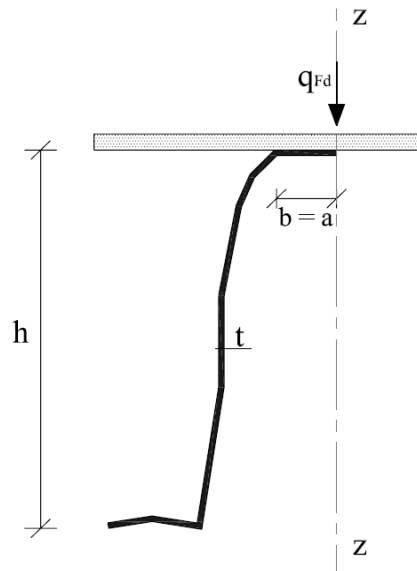


Figura 60 – Metade da secção MadreMax.

Há ainda um aspecto importante no que se refere às propriedades mecânicas, agora não da secção apresentada na figura anterior mas sim de uma parte dessa secção. Isto é, para o cálculo e verificação da resistência à encurvadura do banzo livre, é importante e necessário determinar a inércia apenas do banzo livre segundo o referencial z . O banzo livre define-se como se mostra na seguinte figura.

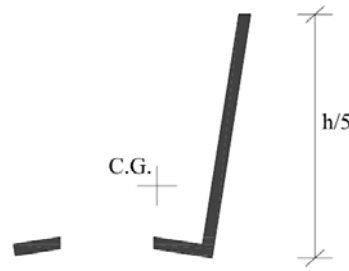


Figura 61 – Definição do banzo livre da secção em estudo.

É de referir o contributo de parte da alma ($h/5$), sugerido no ponto 10.1.4.1 (2) da Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [5].

Este método de cálculo contempla dois modos distintos de carregamento da secção, isto é, prevê duas situações: uma para acções aplicadas descendentemente e outra para acções aplicadas ascendentemente.

De acordo com o ponto 10.1.5.2 da Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [5] a rigidez rotacional da secção em análise é significativamente influenciada pela existência da conexão entre a madre e, por exemplo, o painel de revestimento, e depende directamente do número de ligações entre o elemento madre e a chapa ou revestimento. O Eurocódigo apresenta a seguinte expressão para a determinação desta rigidez rotacional:

$$C_D = \frac{1}{(1/C_{D,A} + 1/C_{D,C})} \quad (4)$$

Onde:

$C_{D,A}$ é a rigidez rotacional da ligação entre a chapa de revestimento e a madre;

$C_{D,C}$ é a rigidez rotacional correspondente à rigidez de flexão da chapa de cobertura.

Desprezando $C_{D,C}$, a rigidez rotacional vem:

$$C_D = C_{D,A} \quad (5)$$

A expressão apresentada pelo Eurocódigo [10.1.5.2 (7) Parte 1-3 [5]] para a determinação de $C_{D,A}$ é a seguinte:

$$C_{D,A} = 130 \times p \text{ [Nm/m]} \quad (6)$$

O valor de p indica o número de ligações por metro linear entre a madre e o que lhe está afixado (painel de revestimento, chapa, etc.)

Uma outra grandeza relevante para o estudo do fenómeno de instabilidade no banzo livre é a Rigidez Elástica Lateral, K .

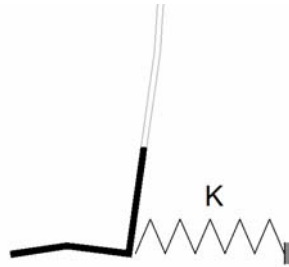


Figura 62 – Rigidez lateral do banzo livre.

A rigidez lateral do banzo livre pode ser simulada, como a figura anterior o demonstra, através da rigidez de uma mola ligada a esse banzo. O cálculo dessa rigidez pode ser efectuado através da expressão (7) em concordância com o ponto 10.1.5.1 da Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [5].

$$K = \frac{1}{\frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d+b_{mod})}{Et^3} + \frac{h^2}{C_D}} \quad [\text{N/mm/mm}] \quad (7)$$

Nesta expressão, ν é o coeficiente de Poisson do material do perfil, E é o módulo de elasticidade, h é a altura da secção, t é a espessura do perfil, h_d é o comprimento do desenvolvimento da alma do perfil (ver figura 63), C_D é a rigidez rotacional, e por último b_{mod} é dado pela expressão:

$$b_{mod} = 2 \times a + b \quad (8)$$

Onde a é a distância desde o ponto de ligação da madre à chapa até à alma da secção e b é o comprimento do banzo superior. No presente caso, e devido à configuração e ao ponto de aplicação das cargas (ligação madre – chapa), o valor de a será considerado igual ao de b .

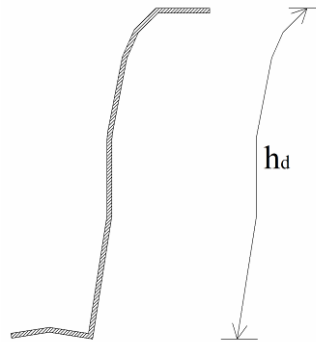


Figura 63 – Definição de h_d .

Relativamente à rigidez conferida pelos apoios, o Eurocódigo sugere o cálculo do coeficiente R , que entre outros factores, depende da existência e número de tirantes de contraventamento aplicados à madre [ponto 10.1.4.1 (7) Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [5]]

$$R = \frac{K \cdot I_a^4}{\pi^4 \cdot E \cdot I_{fz}} \quad (9)$$

A grandeza L_a não é mais que a distância entre tirantes de contraventamento, e como já foi referido, os perfis MadreMax não necessitam da aplicação desses mesmos tirantes, logo o valor de L_a toma o valor do comprimento total do vão. A inércia I_{fz} , também como já foi referido, é a inércia segundo z do banzo livre.

Uma vez determinados estes parâmetros, passa-se para às verificações de resistência propriamente ditas, ou seja, a verificação da *resistência da secção transversal* e a verificação da *resistência à encurvadura do banzo livre*. Dado que se diferenciou a aplicação das cargas conforme a sua direcção, é de extrema importância definir-se correctamente os valores dos esforços instalados na secção consoante se trate de acções descendentes ou ascendentes, assim como os locais propícios para a ocorrência do fenómeno de instabilidade, isto é, as zonas onde o banzo livre se encontre sujeito a compressão.

Relativamente à verificação da resistência da secção transversal, a expressão utilizada é a seguinte, de acordo com o ponto 10.1.4.1 (2):

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (1)$$

Caso seja verificada esta condição, a resistência da secção transversal está desde já assegurada.

Relativamente à resistência à encurvadura do banzo livre, é necessário determinar-se o comprimento de encurvadura do banzo livre da secção, que, pelo Eurocódigo 3 Parte 1-3 [5], pode ser determinado segundo a expressão:

$$l_{fz} = \eta_1 \cdot L_a \cdot (1 + \eta_2 \cdot R^{\eta_3})^{\eta_4} \quad (10)$$

Os valores dos coeficientes η encontram-se nas tabelas 10.2a e 10.2b do ponto 10.1.4.2 da Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [5], e dependem da direcção de aplicação das cargas.

A expressão a verificar para que seja assegurada a resistência à encurvadura do banzo livre é a seguinte:

$$\sigma_{Ed} = \frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} \right) \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

Para a determinação do factor χ_{LT} são necessários os seguintes cálculos intermédios:

$$\bar{\lambda}_{fz} = \frac{l_{fz}/i_{fz}}{\lambda_1} \quad (11)$$

O raio de giração i_{fz} refere-se apenas ao banzo livre, segundo a direcção z .

$$\lambda_1 = \pi [E/f_y]^{0,5} \quad (12)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (13)$$

Onde β toma o valor de 0,75 e α_{LT} de 0,34, segundo a cláusula 10.1.4.2 (1) da Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [5, 22].

As expressões (11) e (12) encontram-se definidas no ponto 10.1.4.2 (2) da Parte 1-3 do Eurocódigo 3 [5] enquanto que a expressão (13) está definida no ponto 6.3.2.3 (1) Parte 1-1 do Eurocódigo 3 [5].

Por fim, a expressão para o cálculo de χ_{LT} é dada por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + (\varphi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{Ez}^2)^{0,5}} \leq 1,0 \quad (14)$$

de acordo com o ponto 6.3.2.3 da Parte 1-1 do Eurocódigo 3 [5].

Para além das verificações apresentadas anteriormente, é também fundamental realizar-se uma verificação relativa às deformações instaladas nos elementos madres quando sujeitas às respectivas acções. Não é demais lembrar que os perfis enformados a frio MadreMax permitem a sobreposição e o consequente reforço das zonas mais críticas do elemento, provindo por isso uma optimização de material e de economia.

Este é um método que ainda se encontra em processo de ajuste e melhoria, e que seguramente será melhorado e complementado em futuros trabalhos de desenvolvimento.

4.2. Aplicação da metodologia de cálculo: exemplos

Neste Sub-capítulo pretende demonstrar a aplicação directa da metodologia de cálculo baseada no EC3 proposta anteriormente. No presente caso optou-se por realizar uma folha de cálculo que contempla todos os passos anteriormente apresentados, facultando de uma forma imediata os resultados.

Este é um método muito abrangente e aplicável a diversas situações, contudo nesta dissertação apenas se apresentará os resultados relativos a um vão, variando as condições de apoio e o sentido de aplicação das cargas, à semelhança do que se fez com os ensaios laboratoriais da *I Fase*.

4.2.1. Exemplo 1: um vão com a madre simplesmente apoiada

Este exemplo contempla uma madre, com um único vão, simplesmente apoiada que será carregada pontualmente aos terços do vão. Considerou-se que a grandeza p tomaria o valor 2, entrando assim em conta com os dois pontos de aplicação das cargas. A tensão de cedência utilizada no cálculo foi a tensão real obtida pelos ensaios de tracção da chapa, ou seja, $f_y = 360\text{MPa}$.

A tabela 8 é uma tabela que resume os resultados obtidos, apresentando três valores distintos: o primeiro diz respeito ao valor da carga de rotura média obtida nos ensaios experimentais para as características de ensaio anteriormente descritas, o segundo é o valor da carga de rotura obtida para a verificação da resistência da secção transversal, e o terceiro valor é o da carga de rotura obtida pelo método de cálculo apresentado para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre. A comparação destes três valores de rotura permite avaliar o grau de certeza e de aproximação do método de cálculo.

Optou-se, por razões de simplificação, apresentar apenas os resultados finais, e não os cálculos intermédios. Estes resultados dependem, como é evidente, do sentido de aplicação das cargas.

Tabela 8 – Resultados do método de cálculo para as condições de simplesmente apoiado.

<i>madre simplesmente apoiada - cargas descendentes</i>	
Carga de rotura (média) obtida nos ensaios experimentais (ensaio n.º 2, n.º 3 e n.º 5 da I Fase) - P_{exp}	10,0 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência da secção transversal - P_{rd}	7,2 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre - $P_{b,rd}$	—

<i>madre simplesmente apoiada - cargas ascendentes</i>	
Carga de rotura (média) obtida nos ensaios experimentais (ensaio n.º 11, n.º 12 e n.º 14 da I Fase) - P_{exp}	7,0 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência da secção transversal - P_{rd}	7,2 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre - $P_{b,rd}$	4,0 kN

Analisando a tabela anterior pode-se verificar que, para as cargas aplicadas descendentemente, o método de cálculo encontra-se pelo lado da segurança apresentado um rácio P_{exp}/P_{rd} de 1,39, ou seja, o valor obtido nos ensaios experimentais é superior ao valor calculado para a verificação da resistência da secção transversal da madre. No que respeita à carga de rotura para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre, esta não é apresentada, pois para cargas descendentes, e estando a madre simplesmente apoiada, o banzo livre do perfil encontra-se sujeito à tracção, não tendo por isso propensão de ocorrência de fenómenos de encurvadura no banzo livre.

No que diz respeito a cargas ascendentes, existe uma diferença clara quando comparada com a análise anterior. Pode-se verificar que o valor da carga de rotura para a verificação da resistência da secção transversal da madre é superior ao valor obtido experimentalmente, apresentando um rácio P_{exp}/P_{rd} de 0,97. Este facto permite induzir que o método de cálculo proposto, para esta situação, não se encontra pelo lado da segurança, contudo pode verificar-se que os resultados são muito próximos entre si. Relativamente ao valor da carga de rotura obtido pelo método de cálculo para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre, este é significativamente inferior ao valor da carga experimental, apresentando um rácio $P_{exp}/P_{b,rd}$ de 1,75.

4.2.2. Exemplo 2: um vão com a madre encastrada nos apoios

Neste exemplo é contemplada uma madre, com um único vão, encontrando-se encastrada nos apoios e que será carregada pontualmente aos terços do vão. Considerou-se que a grandeza p tomaria mais uma vez o valor 2, pela mesma razão do exemplo anterior. A tensão de cedência utilizada no cálculo foi a tensão real obtida pelos ensaios de tracção da chapa, ou seja, $f_y = 360\text{MPa}$.

A tabela 9 é uma tabela que resume, à semelhança da tabela 8, os resultados obtidos, apresentando novamente os três valores distintos de carga de rotura, o primeiro que diz respeito aos ensaios experimentais, o segundo à resistência da secção transversal e o terceiro à resistência à encurvadura do banzo livre.

Mais uma vez, a comparação destes três valores de rotura permite avaliar o grau de certeza e de aproximação do método de cálculo, neste caso para condições de apoio do tipo encastramento.

Note-se que se apresentam apenas os resultados finais, e não os cálculos intermédios.

Tabela 9 – Resultados do método de cálculo para as condições de encastramento.

<i>madre duplamente encastrada - cargas descendentes</i>	
Carga de rotura (média) obtida nos ensaios experimentais (ensaio n.º 4, n.º 6 e n.º 7 da I Fase) - P_{exp}	13,5 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência da secção transversal - P_{rd}	10,7 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre - $P_{b,rd}$	7,8 kN

<i>madre duplamente encastrada - cargas ascendentes</i>	
Carga de rotura (média) obtida nos ensaios experimentais (ensaio n.º 8, n.º 9 e n.º 10 da I Fase) - P_{exp}	11,2 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência da secção transversal - P_{rd}	10,7 kN
Carga de rotura obtida pelo método de cálculo para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre - $P_{b,rd}$	10,7 kN

Analisando a tabela 9 pode-se verificar que para as condições de apoio indicadas e para acções descendentes o valor da carga de rotura obtido nos ensaios experimentais é superior ao valor da

carga de rotura obtida pelo método de cálculo proposto, tanto para a verificação da resistência da secção transversal como para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre do perfil. Comparando os diversos valores obtiveram-se os seguintes rácios: P_{exp}/P_{rd} de 1,26 e $P_{exp}/P_{b,rd}$ de 1,73. Estes rácios traduzem o quão conservador é este método de cálculo.

Relativamente às cargas aplicadas de forma ascendente, pode-se verificar que o valor da carga de rotura para a verificação da resistência da secção transversal é inferior ao valor da carga obtido experimentalmente através dos ensaios, apresentando por isso um rácio P_{exp}/P_{rd} de 1,05. O valor da carga de rotura, obtido pelo método de cálculo para a verificação da resistência à encurvadura do banzo livre, não pode ser superior ao valor da carga de rotura para a verificação da resistência da secção transversal, ou seja: $P_{b,rd} \leq P_{rd}$, daí os valores de rotura serem iguais, e por isso o rácio $P_{exp}/P_{b,rd}$ toma também o valor de 1,05.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Capítulo 5

5.1. Conclusões finais

Relativamente aos resultados obtidos na primeira fase de ensaios, para cargas descendentes (condições de apoios simplesmente apoiado) as madres apresentaram um bom comportamento mecânico, sendo que os valores experimentais da resistência superam os analíticos, o mesmo se passa para condições de apoio do tipo encastramento. De igual modo, para cargas ascendentes (condições de apoio do tipo encastramento) a resistência encontra-se garantida, existindo mesmo uma margem de segurança. Apenas há a realçar uma não conformidade, para o ensaio com cargas ascendentes e simplesmente apoiado, pois para a tensão de cedência de dimensionamento de 320MPa a segurança encontra-se verificada, contudo para a tensão real média da chapa (valor obtido através de ensaios prévios a provetes de chapa retirados da bobine) o valor esperado não foi atingido.

Relativamente aos resultados obtidos na segunda fase de ensaios, para cargas descendentes e sem a aplicação de reforço sobre o apoio central, o comportamento a nível de resistência das madres não apresenta qualquer tipo de problemas, apresentando-se mesmo com uma margem de segurança, já para as cargas descendente mas com aplicação de reforço sobre o apoio central, a resistência apenas se encontra assegurada para o valor de tensão de cedência de dimensionamento (320MPa), embora, como se viu, os valores fora da segurança não se afastam muito da tensão de cedência real. Quanto às cargas ascendentes sem reforço no apoio central, conclui-se que a resistência, tendo por base a tensão de dimensionamento, se encontra garantida, contudo e para a tensão real média da chapa (valor obtido através de ensaios de tracção) essa resistência não se encontra verificada. Quanto às cargas ascendentes com aplicação de reforço no apoio central a resistência não se encontra verificada, nem para a tensão média da chapa, nem para a tensão de dimensionamento, apesar disso, e como o demonstra o ensaio número 15, a aplicação de painel acarreta ganhos significativos na resistência, encontrando-se garantida a segurança para a tensão de cedência de 320MPa, sendo novamente a margem de insegurança muito pequena e perfeitamente coberta usando um factor de segurança $\gamma_{M0} = 1,1$.

De um modo geral, e analisando os ensaios realizados e os seus resultados, constatarem-se dois tipos de colapso: por encurvadura lateral e por encurvadura local [19]. A verificação da segurança das madres relativamente ao fenómeno de encurvadura local está automaticamente assegurada uma vez que as secções transversais são de classe 4, sendo a determinação do valor de cálculo dos esforços resistentes efectuada com base nas secções efectivas. Quanto ao colapso por encurvadura

lateral, deve referir-se que em situação de obra este fenómeno é francamente atenuado pela presença dos painéis de cobertura (ou qualquer outro tipo de material utilizado para cobertura), pois confere um certo grau de contraventamento.

A colocação de chapas metálicas (ensaio n.º 16 da Fase I) a ligar os banzos livres não conduz a qualquer tipo de ganho ou qualquer tipo de melhoria de comportamento do elemento em estudo, uma vez que os resultados não demonstraram qualquer tipo de ganho de resistência. Esta conclusão foi retirada apenas com a realização de um único ensaio, pelo que se deverá proceder à realização de mais ensaios para suportar e confirmar esta conclusão.

A colocação de mais ligadores (parafusos) na zona de sobreposição junto ao apoio central acarreta consigo um aumento da capacidade resistente, como o comprova os resultados do ensaio n.º 6 da Fase II, uma vez que neste ensaio se procedeu ao aumento do número de ligadores na zona de sobreposição e obteve-se um aumento de resistência de 5,4%, aumento este suficiente para garantir a verificação de segurança tanto para a tensão de dimensionamento (320MPa) como para a tensão real média. Conclui-se por isso que a continuidade se encontra garantida através da sobreposição de secções, mas esta é tanto mais eficaz quanto mais parafusos de ligação entre madres forem aplicados. Apesar disso, o número óptimo de ligadores é uma questão que fica por responder, pois para isso seriam necessários a realização de ensaios mais específicos e que focassem esta problemática mais afincadamente.

A abertura da madre é muito reduzida, como o comprova os resultados dos LVDT's horizontais. Apesar de se constatar uma abertura reduzida da secção dos perfis MadreMax, após descarga do sistema esta abertura é completamente recuperada, traduzindo assim o comportamento elástico linear característico destas secções.

Em situações correntes de dimensionamento, é habitual a colocação de reforço, através de sobreposição de perfis MadreMax, a meio vão do primeiro tramo, situação que é mais favorável e que leva a resultados de resistência superiores mas que não foi testada nos vários ensaios realizados para esta dissertação. Os ensaios levados a cabo foram sempre relativos à flexão simples, ou seja, foi apenas testado o eixo forte da madre, encontrando-se o perfil sem qualquer grau de inclinação, o que em situações de serviço é algo não muito comum.

No que diz respeito à tensão de cedência do material, conclui-se que pode variar significativamente de madre para madre, o que consequentemente acarreta consigo uma variação

do comportamento, sendo este facto uma possível justificação para a discrepância de resultados que por vezes se fizeram sentir.

Os ensaios aqui apresentados encontram-se voltados para uma vertente científica uma vez que em situações reais dificilmente a aplicação das cargas é efectuada de forma pontual, mas sim de forma distribuída, assim como as condições de apoio uma vez que dificilmente se encontram em situações de simplesmente apoiado ou puramente encastrado, mas sim numa situação intermédia desta.

Relativamente ao método de cálculo, aplicado a apenas um vão, pode concluir-se que este é um método conservativo. A nível de resistência da secção, os resultados obtidos experimentalmente são superiores aos obtidos pelo método de cálculo, excepto para a situação de uma madre simplesmente apoiada e sujeita a cargas ascendentes, onde o valor da carga de rotura obtido experimentalmente é inferior ao valor da carga de rotura obtida pelo método de cálculo, apesar de estes dois valores serem muito próximos.

Quanto à resistência à encurvadura do banzo livre do perfil, os resultados experimentais superam sempre os resultados obtidos pelo método de cálculo. Tendo em conta o que foi dito, deverão ser propostas fórmulas específicas para este tipo de secção.

Para finalizar, a madre apresenta um bom comportamento mecânico apesar de se evidenciar alguns problemas pontuais no que respeita à encurvadura local, traduzindo-se pela formação de vincos registados nos ensaios. Conclui-se também que, especialmente para acções descendentes, a madre em questão apresenta um comportamento elasto-plástico, justificando assim os patamares de cedência verificados nos gráficos força – deslocamento.

5.2. Desenvolvimentos futuros

A análise experimental realizada nesta dissertação teve apenas como referência os ensaios desenvolvidos, ou seja, ensaios à flexão simples. Contudo, considera-se importante desenvolver e concretizar outro tipo de ensaios que permitam um conhecimento mais aprofundado e geral deste tipo de perfis. Ensaaios à flexão desviada, ensaios à compressão, ou até mesmo ensaios à flexão composta darão um contributo importante para o conhecimento mecânico dos perfis, contribuindo para uma racionalização e aproveitamento na sua aplicação.

Igualmente importante será realizar-se ensaios mecânicos, como os que foram abordados nesta dissertação e outros, como os sugeridos no parágrafo anterior, às restantes secções MadreMax existentes, ou seja, $\Omega 150 \times 1.5$ e $\Omega 200 \times 2.0$. Devido ao seu grande leque de aplicação, e também às novas exigências regulamentares, o estudo destes perfis em situação de incêndio acarretaria uma mais valia a quem se dedica à concepção de estruturas modernas.

Por último, sugere-se a optimização do método de cálculo proposto baseando-se não só no EC3 mas também nos diversos ensaios já realizados e propostos, através da introdução de coeficientes capazes de fornecer resultados analíticos seguros e ao mesmo tempo económicos.

REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lopes, N.; Oliveira, F.; Pires, B.; Vila Real, P. – “MadreMax, um sistema inovador de madres enformadas a frio - exemplo de cooperação Universidade-Indústria”, actas do Congresso Construção 2007, resumo pp. 53 e artigo em CD, ISBN 972-49-2008-9, Coimbra, Portugal, 17 a 19 de Dezembro de 2007.
- [2] Silvestre, N.; Camotim, D. - Inovação e Tecnologia: Estruturas de aço enformadas a frio – utilização, comportamento e dimensionamento de acordo com o EC3-1-3. Engenharia e Vida, n.º 30. Dezembro, 2006.
- [3] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-5. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-5. Plated structural elements. Brussels, Belgium, 2003.
- [4] Vila Real, P. - Incêndio em estruturas metálicas. Lisboa: Edições Orion, 2003.
- [5] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-3. General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels, Belgium, 2004.
- [6] Gervásio, H.; Simões da Silva, L. - Sustentabilidade e funcionalidade das estruturas metálicas. Jornada Técnica LSK sobre a utilização de aços enformados a frio na construção. Exponor. Porto, 2006.
- [7] Constálica S.A.. Sítio da internet, 2008. www.constalica.pt.
- [8] Vila Real, P.; Lapa, J.; Oliveira, F.; Lopes, N. – Estudo de secções metálicas enformadas a frio para execução de MadreMax - Fase I - Caracterização geométrica das secções com vista ao dimensionamento simples através do disposto no Eurocódigo 3, requerido pela empresa Constálica – Elementos de Construção Metálicos, Lda, realizado na Universidade de Aveiro, Setembro de 2005.
- [9] Vila Real, P.; Lopes, N.; Pires, B.; Oliveira, F. – Estudo de secções metálicas enformadas a frio para execução de MadreMax - Fase II - Elaboração de um programa de cálculo automático para verificação da segurança das madres, requerido pela empresa Constálica – Elementos de Construção Metálicos, Lda, realizado na Universidade de Aveiro, Fevereiro de 2007.

- [10] Constálica S.A.. Catálogo comercial MadreMax – tabelas de pré-dimensionamento, 2006.
- [11] NP EN ISO 9001 – Sistema de gestão da qualidade – Requisitos (ISO 9001:2000). Instituto Português da Qualidade, 2000.
- [12] CEN, European Committee for Standardisation. EN 10326. Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels – Technical delivery conditions. Brussels, Belgium, 2004.
- [13] Sítio da internet. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Neoprene>
- [14] Boff, A.; Tonet, D.; Maurina, F.; Cemin, P. - Tecnologia LVDT (Linear Variable Differential Transforme). Centro de Ciências Exactas e Tecnologia – Universidade de Caxias do Sul (UCS). Brasil.
- [15] INEGI, Manual de Utilizador do software DynaTester. Porto, 2006
- [16] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-8. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8. Design of joints. Brussels, Belgium, 2005.
- [17] CEN, European Committee for Standardisation. prEN 1090-2: 2005 – Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for the execution of steel structures.
- [18] Nolasco, A. - Relatórios de Ensaios – Fase I e II, perfis enformados a frio: sistema MadreMax. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro: Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo, 2008.
- [19] Vila Real, P.; Lopes, N. – Conclusões finais aos ensaios realizados às madres enformadas a frio do sistema MadreMax, requerido pela empresa Constálica – Elementos de Construção Metálicos, Lda, realizado no Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo (LERF) da Universidade de Aveiro, Setembro de 2008.

- [20] Lukic, M. - Calcul d'une panne Z sous bac acier continue sur trois appuis. Revue Construction Métallique, n.º 4. CTICM – Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, 2003.

- [21] Gervásio, H.; Simões da Silva, L.; Simão, P. - Dimensionamento de elementos metálicos com perfis enformados a frio de acordo com a parte 1.3 do Eurocódigo 3. IV Congresso de Construção Metálica e Mista, Lisboa, Dezembro de 2003.

- [22] CEN, European Committee for Standardisation. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1. General rules and rules buildings. Brussels, Belgium, 2005.

ANEXOS

Apresenta-se de seguida um exemplo de um Relatório de Ensaio. Para aceder aos restantes, remete-se para a leitura do documento *Relatórios de Ensaios I e II Fase* [18], documento que, como já foi explicado, contém todos os relatórios dos ensaios realizados nas duas fases.

ENSAIO N.º 4 (Fase II)

1. Dados

Nome do Ensaio: Ensaio à Flexão Simples – 2 vãos simplesmente apoiada com reforço no apoio intermédio – MadreMax 100x1.5

Ficheiro do Ensaio: ENSAIO04-080208.xls

Data de Realização: 8 de Fevereiro de 2008

Hora de Realização: 11:00 horas

Local de Realização: Universidade de Aveiro

Laboratório: Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo: LERF - UA

Técnicos: Eng. Nuno Lopes (UA), Eng.^a Cláudia Amaral (UA), Eng. Alexandre Nolasco (UA)

2. Dispositivo de Ensaio

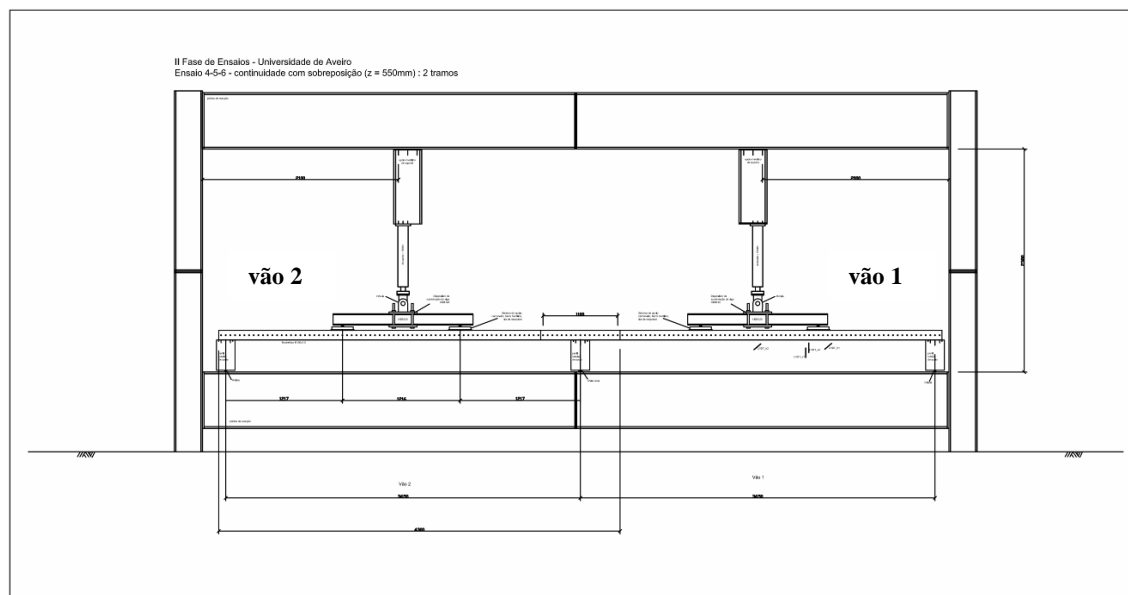


Figura 64 – Dispositivo do Ensaio n.º 4 – II.

3. Descrição do Ensaio

Ensaio à flexão simples, encontrando-se o elemento em estudo simplesmente apoiado sobre 3 perfis tubulares 322 x 322 x 8, e em continuidade com aplicação de reforço, isto é, com sobreposição de MadreMax no apoio central de 1100mm, contudo não foi aplicada sobreposição nos vãos. A aplicação das cargas é executada de forma descendente e as ligações são realizadas por intermédio de 4 parafusos M10 da classe 8.8, por apoio, sendo a definição do comprimento de cada vão relativa ao eixo de cada apoio. Para além dos parafusos no apoio central que também ligam as madres, colocaram-se mais 4 parafusos para se garantir a correcta sobreposição das MadreMax. Os pontos de aplicação da carga situaram-se sensivelmente a 1217mm dos apoios e a zona de contacto da aplicação da carga distribui-se por 230mm e encontra-se protegida por uma tira de neoprene. Existe um troço de viga HEB120 que transmite a força directamente do actuador para os dois pontos de aplicação de carga. O dispositivo de aplicação da carga pontual foi composto por uma tira de neoprene, uma barra metálica com significativa rigidez, e uma pequena cantoneira que possibilita a ocorrência de rotação durante o desenvolvimento do ensaio. Foram introduzidos na totalidade 4 LVDT's, 2 que medem deslocamentos verticais nos banzos livres, (V1: LVDT 94388 e V2: LVDT 94389), e 2 LVDT's horizontais que medem deslocamentos nessa direcção, apenas no vão 1 (H1: LVDT 94201 e H2: LVDT 94200). Para simular as condições de apoio desejadas, colocaram-se roletes metálicos (30mm de diâmetro) sob os apoios extremos e uma peça em “meia cana” sob o apoio central.

A velocidade de aplicação de carga imposta no actuador foi de 0,02 mm/seg.

4. Registos Fotográficos





Figura 65 – Registos fotográficos do Ensaio n.º 4 – II.

5. Resultados

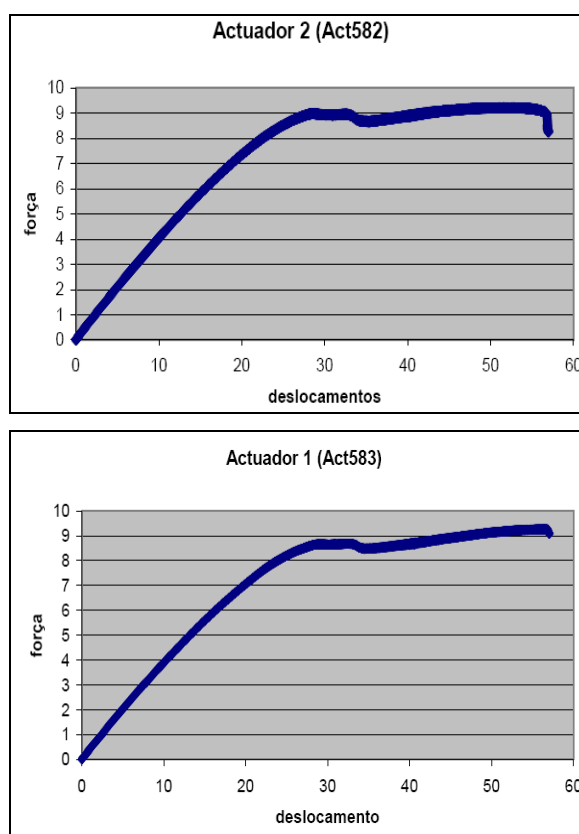


Figura 66 – Força - deslocamento – LVDT interno do actuador.

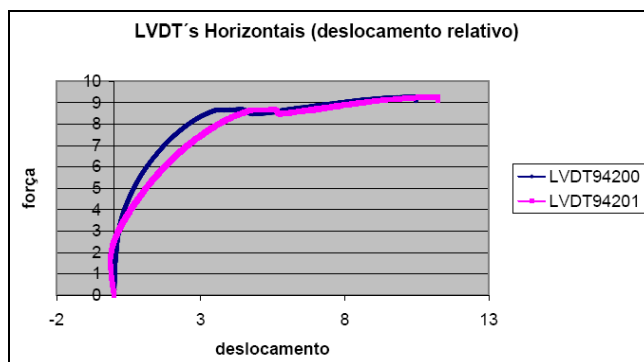


Figura 67 – LVDT's horizontais – deslocamentos relativos entre os dois banzos livres.

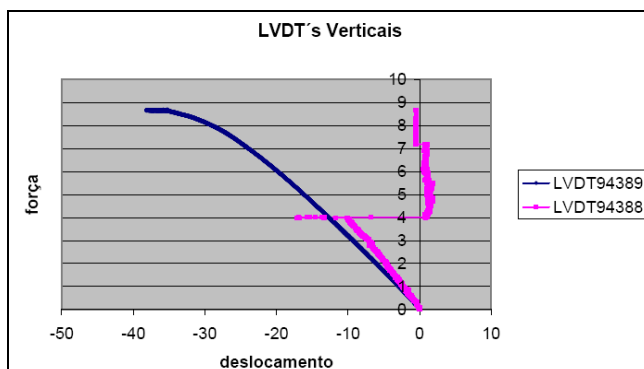


Figura 68 – LVDT's verticais – sob os pontos de aplicação das cargas e a meio vão.

6. Notas e Observações

Tentou-se que a aplicação da carga fosse o mais alinhado possível com o perfil afim de não introduzir excentricidades indesejáveis. O nivelamento dos apoios e do dispositivo de aplicação das cargas também foi cuidado. Contudo fica aqui a ressalva que uma ligeira imperfeição no nivelamento do banzo superior do perfil e as imperfeições do próprio pórtico de reacção poderiam ter influenciado os resultados finais.

A massa total dos dispositivos complementares (acessórios para aplicação da carga), já contando com o peso próprio da madre, é de 77,22Kg. É de referir que em todos os ensaios, os valores de deformação apresentada nos resultados do LVDT interno do actuador entram

também a deformação da própria viga HEB120 que fez a distribuição das cargas e a deformação da própria tira de neoprene, deformações que inflacionaram a deformação final do perfil MadreMax em estudo. Verificou-se uma pequena imperfeição da madre na zona da aba, junto do local do posicionamento do LDVT vertical 1. Logo após ao início do ensaio constatou-se um problema no LVDT vertical 1 (V1), uma vez que não emitia qualquer valor, pelo que se decidiu retirá-lo.

Constatou-se ainda que, por imposições físicas do pórtico de reacção e do comprimento da madre, foi induzida uma pequena excentricidade no ponto de aplicação da carga, uma vez que o ponto a meio vão do tramo 1 e o ponto de aplicação da carga se encontram desfasados de 15mm, enquanto que no tramo 2 esse desfasamento é de 12mm.

7. Conclusões

Em semelhança com o que se passou nos ensaios anteriores, neste também se registou um comportamento elástico da secção, verificando-se após descarga uma recuperação da sua forma excepto nas zonas onde se constatou a plastificação da secção. Contudo, e como se pode observar nos gráficos n.º 4, a curva força - deslocamento de ambos os actuadores traduz o tradicional comportamento do material aço, verificando-se numa primeira parte uma fase elástica seguida de um patamar de cedência e logo de seguida um ganho de resistência que culmina na rotura, verificando-se perdas seguida de ganhos da resistência logo após o patamar de cedência.

Para a carga de 6,5kN, o vão 2 começa ligeiramente a rodar sobre o seu eixo, fenómeno este que se acentua no decorrer do ensaio e que na zona próximo do apoio central obriga a uma abertura ligeira da madre.

Para a carga de 8,5kN formou-se o primeiro vinco (plastificação) no banzo livre imediatamente a seguir ao apoio central e no vão 2, contudo o segundo ponto a plastificar deu-se para a carga de 9,1kN, também no vão 2, verificando-se uma estabilização da carga.

Constatou-se que as forças nos actuadores começaram a diminuir até um valor de aproximadamente 8,8kN, voltando de seguida a aumentar, como está ilustrado nos gráficos força - deslocamento.

Para os 9,3kN forma-se um terceiro vinco (mais uma vez no vão 2) num local próximo do apoio e ao contrário das duas primeiras plastificações, esta dá-se na alma do perfil.

O primeiro vinco que se formou encontrou-se na eminência de romper, contudo não sucedeu, mas verificava-se claramente o local onde essa rotura se daria.

Junto ao apoio central, observou-se uma deformação transversal na secção do elemento que não foi recuperada após descarga dos actuadores, tal como sucedeu nos ensaios anteriores.

Verificou-se ainda um fenómeno de plastificação no ponto de aplicação da carga no vão 2.

Neste caso, observou-se uma assimetria no comportamento dos vãos, apresentando o vão 1 uma maior capacidade resistente do que o vão 2, estando este facto possivelmente ligado a um deficiente alinhamento entre o actuador, a viga e a madre, bem como do facto das cargas não estarem aplicadas de forma perfeitamente simétrica.

Registou-se um valor de rotura de 9,276kN no actuador 1 e no actuador 2 esse valor é de 9,227kN. A estes valores deverá adicionar-se 0,7722kN, perfazendo assim um valor de rotura médio de **10,0kN**.